

870115

7
24

UNIVERSIDAD AUTONOMA DE GUADALAJARA

INCORPORADA A LA UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO
FACULTAD DE INGENIERIA



A handwritten signature in black ink, appearing to read "Serrano", written over a rectangular stamp.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

CIMENTACION DE MAQUINARIA

TESIS PROFESIONAL
QUE PARA OBTENER EL TITULO DE
INGENIERO CIVIL
PRESENTA

Mannel Godinez Serrano

GUADALAJARA, JAL.

1987



UNAM – Dirección General de Bibliotecas Tesis Digitales Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS © PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis está protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

INDICE

	Página
INTRODUCCION	1
Importancia del tema	3
Antecedentes	10
I GENERALIDADES	12
I.1 Consideraciones generales	12
I.2 Vibraciones	15
I.3 Impacto	24
II COMPORTAMIENTO DEL SUELO	29
II.1 Propiedades	29
II.2 Pruebas	41
II.3 Efectos de las vibraciones	49
III COMPORTAMIENTO DE LA ESTRUCTURA	53
III.1 Tipos de fallas	53
III.2 Métodos de protección	58
III.3 Tipos de anclaje	68
III.4 Aislamiento y amortiguadores	103
OV CRITERIOS DEL DISEÑO	118
IV.1 Posibles soluciones	118
IV.2 Máquinas	121

IV.3	Diseño de cimentación para diferentes máquinas	140
IV.4	Cimentación de un martillo	149
V	PROCEDIMIENTOS CONSTRUCTIVOS	158
VI	CONCLUSIONES	161
	BIBLIOGRAFIA	164

INTRODUCCION

La práctica de la construcción industrial moderna, requiere de soluciones efectivas de muchos problemas concernientes al funcionamiento de las cimentaciones sujetas a cargas dinámicas, la propagación de ondas en el suelo y los efectos de estas ondas sobre la estructura.

Se ha trabajado en los laboratorios sobre la investigación de las propiedades elásticas del suelo y en los cambios de sus características físico-mecánicas (en particular: la fricción interna, la cohesión y la relación de huecos) bajo la influencia de las vibraciones, en el estudio de las vibraciones de cimentaciones masivas y en el estudio de cargas excitadoras provocadas por diferentes tipos de máquinas.

En suma, muchos de los laboratorios se han dedicado al estudio de la programación de ondas elásticas en el suelo de origen industrial; en el aislamiento de estas ondas por varios métodos, y en la investigación de la influencia de algunos otros factores en la propagación de ondas.

Considerable atención han tenido los laboratorios en

el estudio de las vibraciones de las cimentaciones, y la acción sobre la estructura de las ondas emanadas de las cimentaciones.

La investigación extensiva de estos trabajos, llevada a cabo por el laboratorio en el campo de la dinámica de suelos y bases de cimentaciones, hace posible, primeramente, copilar especificaciones estándar para utilizarlos luego en el cálculo; diseño y construcción de cimentaciones de maquinaria con cargas dinámicas.

El uso de estas especificaciones estándar en el diseño de proyectos industriales, ha sido muy efectivo, tanto en los aspectos ingenieriles, como en el económico de la construcción.

IMPORTANCIA DEL TEMA

El desarrollo tecnológico cada vez mayor, hace que el tema ingenieril: CIMENTACION DE MAQUINARIA, se le de la adecuada importancia para ir a la par con el avance mecánico.

Los progresos técnicos e industriales son acompañados por un incremento en el número de máquinas en uso, y el crecimiento de su potencia, así como la introducción de operaciones de dinamitación dentro de la práctica de la construcción y el incremento de la rapidez, intensidad, y tonelaje de varios tipos de motores y turbinas.

El perfeccionamiento de la construcción de los motores de combustión y de las turbinas de vapor en los últimos años, ha llegado a desarrollar de tal modo los esfuerzos estáticos y dinámicos sobre las cimentaciones, que de no disponer de un buen armado para absorber las tensiones originadas por dichos esfuerzos, los macizos de cimentación se agrietan de tal forma, que puede dar lugar a grandes perturbaciones.

Todos estos factores dirigen a un incremento en la influencia de impactos y vibraciones, el estudio de el

cual son objeto, es de una nueva rama de la mecánica llamada: SISMOLOGIA INDUSTRIAL. Una de las divisiones más importantes de la sismología industrial es la dinámica de bases y cimentaciones, el cual estudia los problemas de impactos y vibraciones de cimentaciones bajo instalaciones industriales, así como las leyes que gobiernen la propagación de ondas de estas cimentaciones a través del suelo.

Los problemas resueltos por estudios de la dinámica de bases y cimentaciones son de una gran importancia en la práctica de la ingeniería.

Las vibraciones de cimentación de máquinas son perjudiciales a la operación de las mismas máquinas. En el caso de tener un diseño insatisfactorio, las cimentaciones de varios pistones compresores de gas instalados en un mismo edificio pueden sufrir vibraciones considerables. Los compresores, estando rígidamente conectados a las cimentaciones, también sufrirán vibraciones de gran amplitud, las cuales serán transmitidas a los tubos principales. Frecuentemente las vibraciones causan daños por igual a algunos tubos cercanos a las compresoras vibratoras. Esto puede causar el escape de gas explosivo dentro de las instalaciones de la compresora: como resultado final el edificio puede fallar.

Las mediciones de las vibraciones de las cimentaciones y los yunques de martillos en operación demuestran que algún 10% de las partes golpeadas se fatigan por la excitación de las vibraciones de la cimentación y el yunque.

Las vibraciones inducidas por una cimentación vibrando generalmente causan un pobre desempeño de las conexiones de la máquina. Las cuales quizás se calientan o se desgastan asimétricamente.

En suma, las vibraciones de cimentación bajo las máquinas de velocidades altas, causan fatigas prematuras en las partes de la máquina.

Las vibraciones y choques también tienen un efecto dañino sobre las mismas cimentaciones. Aunque algunos casos han sido registrados en las cuales las cimentaciones de máquinas han sido destruídas por esas vibraciones o choques dirigen a un rápido alargamiento de grietas las cuales fueron inicialmente causadas por otros factores, tales como los esfuerzos, impuestos por asentamientos diferenciales de la cimentación. Estas vibraciones están dirigidas a la destrucción de las cimentaciones.

Las máquinas reciprocantes tienen comparativamente baja velocidad, de un orden semejante de magnitud como los valores principales característicos de la vibración natural de las estructuras. Consecuentemente si la frecuencia de la propagación de ondas de la cimentación de una máquina de baja frecuencia coincide con la frecuencia natural de las vibraciones, entonces se desarrolla en la superestructura el efecto de resonancia.

Si un edificio sufre vibraciones de amplitud considerable, los trabajos dentro de el edificio son difícil de efectuarse o prácticamente imposibles. Algunas vibraciones tienen un efecto dañino sobre el hombre si vive en cuartos que están localizados en el edificio vibrante nos demuestran que las personas sujetas al día y la noche a la acción de las vibraciones pueden sufrir desde dolores de cabeza, insomnio, nervios, etc. Estudios completos de la dinámica de bases y cimentaciones fueron necesarios para vencer los efectos dañinos de algunos procesos vibratorios.

Los problemas de la dinámica de bases y cimentaciones son importantes también desde un punto de vista económico. Porque la capacidad de soporte de los suelos bajo máquinas de cimentación fué usualmente tomada como 50 a 60% de valores correspondientes a la acción de solo cargas estáti-

cas, en muchos casos las bases fueron reforzadas con pilotes. Esto provoca que subiera demasiado el precio de las cimentaciones. La clarificación en años recientes de algunos problemas pertenecidos a la dinámica de bases de estructuras ha hecho posible un incremento en los valores de diseño de la capacidad de aguante del suelo, bajo cimentaciones de máquinas de arriba de 80 a 100% de los valores de las cargas estáticas.

Las vibraciones o choques a cimentaciones de maquinaria, provocan considerables asentamientos no uniformes, por lo cual se necesitan ajustes periódicos y un calibrado de las máquinas.

Una cimentación sujeta a vibraciones llega a ser un originador de ondas propagadas a través del suelo, el cual tiene un efecto dañino sobre la estructura y la gente que esté en él. Estas ondas también impiden la operación normal de las plantas industriales. Se ha demostrado que la propagación de ondas de las cimentaciones bajo martillos, causan daño a la estructura o la destruyen completamente.

Las ondas de las cimentación de martinetes, frecuentemente causan asentamientos diferenciales de columnas. Los impactos sobre las cimentaciones de martillos provocan

tanto grietas en el carril de la grúa viajera del edificio, como distorsiones de los marcos de ventanas y daño de algunas conexiones de elementos estructurales, etc.

Las ondas de cimentaciones de máquinas afectan no sólo a la estructura, sino también varios procesos tecnológicos, la operación de máquinas de precisión y otros mecanismos.

Hay casos que son conocidos de la práctica industrial, en la cual cimentaciones de máquinas, con efectos de impactos, impiden la operación de varios mecanismos y causan un incremento en la cantidad de rechazo en las molduras y talleres de máquinas.

Un efecto dañino sobre las estructuras, y especialmente en el proceso tecnológico dentro de esas estructuras, puede ser producida por la propagación de ondas de las cimentaciones bajo máquinas de baja frecuencia, con un régimen estable de operación, tales como las compresoras diesel y los marcos de sierra.

Así ahora, las instalaciones de los pilotes pueden ser evitados en muchos casos. El costo de algunas bases de máquinas industriales potentes puede llegar a encarecer

bastante un solo proyecto.

Hasta recientemente, se tenía la creencia en el diseño que entre más grande era la masa de una cimentación de máquinas, se empequeñecía la amplitud de las vibraciones, por lo tanto, las cimentaciones de máquinas se diseñaban como bloques masivos, alcanzando algunas veces un peso de varias miles de toneladas y posiciones de profundidades arriba de 10 a 12 metros.

La construcción de tales cimentaciones involucraba un gasto considerable de materiales y tiempo. El estudio de las interrogantes del diseño racional de cimentaciones, dejó a la conclusión que, desde el punto de vista de la estabilidad dinámica, es oportuno hacer las cimentaciones tan prácticas como económicas.

ANTECEDENTES

El diseño de Cimentación de Máquinas, es un problema sumamente complejo. Aun en los países más industrializados se acostumbra diseñar estas cimentaciones por medio de recetas más o menos empíricas, y por lo tanto, aplicable sólo a las características de la maquinaria y del suelo para las que fueron deducidas.

Está por demás decir que estas recetas (del tipo: tantos metros cúbicos de concreto para cada kilowatts de potencia de la máquina) además de anti-económicas pueden llevar y han llevado a fracasos lamentables.

Sin embargo, después de tener referencias de los resultados obtenidos por otros ingenieros nos damos cuenta del duro camino que tuvieron que recorrer para evitar errores lo cual provoca en nosotros una visión más acertada en base a sus experiencias.

Entre los ingenieros que han hecho estudios importantes, tenemos a G.I. Pokrovsky y Asociados, que fueron los primeros en investigar experimentalmente la influencia de las vibraciones sobre el coeficiente de fricción interna. El resultado de este experimento fué publicado en el año

de 1934, demostrándose con esto, que el coeficiente de fricción interna depende de la energía cinética de las vibraciones; por lo cual, a medida que la energía crece, el coeficiente decrece, aproximándose a un valor del 25 a 30% más pequeño que el observado antes de las vibraciones.

I GENERALIDADES

I.1 CONSIDERACIONES GENERALES

Las vibraciones que ocurren en la maquinaria rotativa y en las estructuras circundantes, es el resultado de defectos mecánicos de la maquinaria o de causas inherentes al modo en la que dicha maquinaria opera.

Las vibraciones exteriores pueden ser evitadas mediante el empleo de aislamientos. Los aislamientos consisten en la separación de la estructura de la fuente generadora de vibraciones, por medio de materiales absorbentes, tales como hule, corcho, muelles, resortes, etc. Cada uno de los materiales tiene distinta capacidad para oponerse a la retransmisión de vibraciones. La capacidad transmisora de los materiales de aislamiento contra vibraciones, es una función del tipo de material, la intensidad y la frecuencia de las vibraciones, así como la carga que dicho material tiene que soportar.

Las mayorías de las máquinas vibran como consecuencia de sus defectos mecánicos, y estos defectos se harán sentir en todos los casos, ya que aún no existe la máquina perfecta.

Una máquina bien diseñada y bien construída, trabajará suavemente porque sus defectos son pequeños, pero cuando los defectos son grandes, se producirán vibraciones excesivas.

Respecto a la estructura sobre la que va a estar la máquina, tenemos que el concreto reforzado tiene bastante aplicación, las carga estáticas tienen relativamente poca importancia, comparadas con los efectos de las masas vibratorias.

Aunque los fabricantes de máquinas proporcionan éstas más o menos equilibradas, siempre quedan acciones dinámicas remanentes no compensadas que tienen que ser tomadas en cuenta.

Las cimentaciones para máquinas están sometidas tanto a esfuerzos estáticos, debido a la carga muerta total, como a los esfuerzos dinámicos producidos por las fuerzas de la inercia, según la segunda ley de Newton; fuerza (F) es igual a masa (M) por aceleración (A). Debido a esto, las partes de una máquina en movimiento dan lugar a vibraciones que, muchas veces producen efectos bastante complejos. Estos efectos dependen de la clase de máquina de que se trate, y por lo tanto, las características de la cimen-

tación serán de acuerdo a esa variación en la maquinaria.

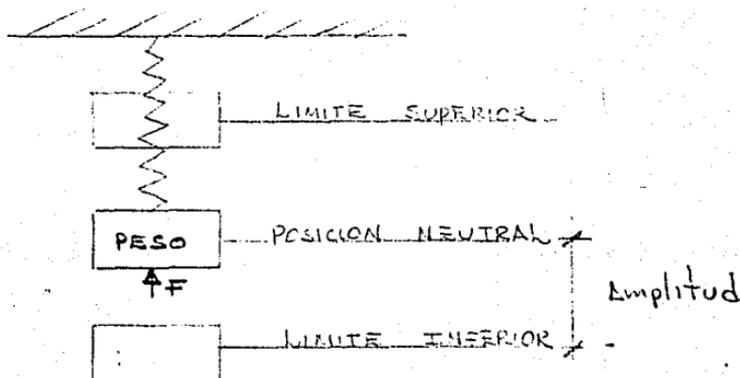
Las características principales de una cimentación para máquinas, pueden resumirse así:

- a) Ser de tal naturaleza que pueda absorber en su interior, ya sea total o parcialmente, los esfuerzos producidos por las fuerzas de inercia.
- b) Evitar el fenómeno de resonancia, que se produce cuando el número de revoluciones de la máquina, coincide con las oscilaciones propias de la cimentación, lo que hace imposible el funcionamiento de las máquinas.
- c) Anular, mediante el empleo de adecuados amortiguadores, las vibraciones remanentes.

I.2 VIBRACIONES

La vibración es un movimiento oscilatorio, trepidatorio o de vaivén de la máquina o de algún elemento de la misma, apartándose de la posición de reposo.

El método más simple para apreciar las vibraciones es seguir los movimientos de un peso suspendido en un resorte. Esta es una condición característica de todas las máquinas, ya que todas ellas tienen propiedades de peso y de elasticidad.



Mientras no se aplique una fuerza al peso suspendido para obligarlo a moverse, no existirán vibraciones. La aplicación de una fuerza obligará al peso a moverse hacia arriba, comprimiendo el resorte.

Al cesar la fuerza aplicada, el peso se moverá hacia abajo, rebasando la posición neutral hasta llegar a un punto límite y regresar, rebasando nuevamente, en sentido inverso la posición neutral. Este movimiento continuará desarrollándose exactamente en la misma forma, mientras esta fuerza continúe siendo aplicada. Eso es vibración.

Otros factores que deben considerarse en el estudio y análisis de las vibraciones, son a saber: Período, frecuencia y amplitud. Período: se llama así, al intervalo de tiempo en que transcurre un ciclo de una vibración. Frecuencia: es el número de ciclos por segundo, en que se repite la vibración. Amplitud: es el desplazamiento máximo en dirección radial de un elemento giratorio; por efecto de juego, desajuste o deformación propia de la pieza.

Toda vibración completa su ciclo, cuando la pieza ha girado 360 grados, lo cual implica que el desbalance causante de la vibración, se encuentre en una posición angular definida, a una distancia radial constante y de un va-

lor en peso también constante.

La gran rapidez de los avances tecnológicos, hace imposible establecer una clasificación precisa, tanto de las diferentes máquinas que pueden inducir vibraciones en una estructura, como de los tipos de vibración inducidos por dichas máquinas. En el análisis y diseño de las estructuras, es necesario tomar en cuenta los efectos dinámicos inducidos por maquinaria en operación.

Toda máquina en operación produce vibraciones que son transmitidas a la estructura que la soporta, a la cimentación sobre la que está desplantada y al terreno vecino.

Las vibraciones que interesan en el diseño de una estructura, sujeta a la acción de máquinas en operación, situadas en la misma estructura o en su vecindad, se clasifican de la forma siguiente:

- a) Vibraciones transitorias. Tienen amplitud y frecuencia, variando a través del tiempo.
- b) Vibraciones estacionarias. Tienen amplitud y frecuencia constante a través del tiempo.

Las vibraciones transitorias son debidas a fenómenos de tipo impulsivo, como los producidos por martillos.

Las vibraciones estacionarias se deben a fenómenos de carácter repetitivo, producidos por otros tipos de máquinas. Estas se subdividen de acuerdo con la velocidad de la máquina, en vibraciones de alta y baja frecuencia. Las vibraciones de baja frecuencia son producidas generalmente por máquinas reciprocantes impulsadas por émbolos, en tanto que las de alta frecuencia están asociadas generalmente a máquinas rotatorias, como turbinas de vapor, turbinas hidráulicas y motores eléctricos.

GRADOS DE LIBERTAD

Se llama así, al número de direcciones en las cuales se puede mover un cuerpo. Esto implica, que cuando un desbalance ocasiona movimientos en el menor número de direcciones posibles, dicho desbalance es más sencillo; desde luego, que no deben tenerse restricciones en la libertad de movimientos en otras direcciones; ya que, por esas oposiciones se pueden presentar desgaste excesivos e inclusive, la ruptura del equipo.

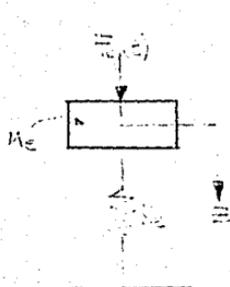
Sistemas continuos.- Son cuerpos que tienen un número

infinito de grados de libertad, así como un número infinito de coordenadas que son necesarias para describir el movimiento de estos cuerpos elásticos.

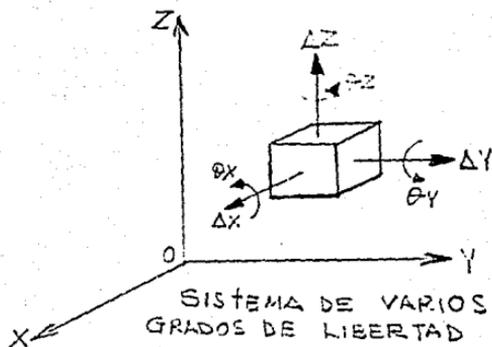
Sistemas discretos.- Se les llama a los sistemas que tienen un número finito de grados de libertad.

Sistema de un grado de libertad.- Es aquél en que el estado del sistema con movimiento rectilíneo o rotacional, en cualquier tiempo, se determina por una simple coordenada asociada con la masa.

Sistemas de varios grados de libertad.- Un cuerpo libre en el espacio tiene seis grados de libertad, de los cuales tres coordenadas definen su posición lineal y los otros tres determinan la posición angular.



SISTEMA DE UN GRADO DE LIBERTAD

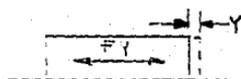


SISTEMA DE VARIOS GRADOS DE LIBERTAD

Modos de vibración.- Al ser excitadas dinámicamente las bases de cimentaciones, pueden vibrar de cuatro modos diferentes, como se indica en la figura.



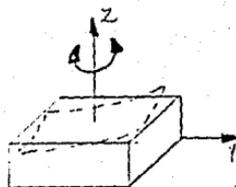
TRANSLACION VERTICAL



TRANSLACION HORIZONTAL



CAJECERO



TORSION

El modo vertical.- Es originado por fuerzas dinámicas verticales.

El modo horizontal.- Es provocado por fuerzas dinámicas horizontales, que actúan en el contacto de la cimentación-suelo.

El modo de torsión.- Es originado por momentos de torsión que producen vibraciones de tipo giratorio.

El modo de cabeceo.- Es generado por fuerzas dinámicas horizontales, que actúan a cierta distancia de la base de la cimentación y originan momentos de volteo, que producen movimiento de cabeceo acoplados a vibraciones horizontales.

Frecuencia natural.- Es la frecuencia que depende de las condiciones elásticas del sistema en sí, y no es función de fuerza externa alguna.

Frecuencia resonante.- Esta frecuencia se presenta a una velocidad angular, tal que la fuerza de excitación ocasiona la máxima vibración, coincidiendo con la frecuencia natural del sistema.

Cuando esta situación se presenta, se tienen las con-

diciones más críticas, por coincidir las amplitudes de los desbalances en el intervalo de tiempo en que se presentan; y aumentan sus magnitudes vectorialmente, dando como resultado, que la amplitud del desbalance resultante vaya aumentando a través del tiempo.

Tipos de vibraciones.- Las vibraciones se presentan en dos tipos generales, que son: vibraciones libres y vibraciones forzadas.

Vibraciones libres.- Son las que se deben a fuerzas elásticas internas, sin que influyan fuerzan externas, excepto la gravitacional.

Vibraciones forzadas.- Son las originadas por la acción de fuerzas externas, incluyendo la gravitacional.

Amortiguamiento.- Proceso por el cual, la vibración disminuye continuamente en amplitud. En la amortiguación, la energía del sistema de vibración se disipa como fricción o calor, o se transmite en forma de sonido.

Amortiguación interno.- Es la pérdida de energía interna de un suelo, debido a efectos viscosos e histeretico estos efectos de amortiguación se originan, por el compor-

tamiento inelástico del suelo bajo la cimentación.

1.3 IMPACTO

Entre las fuerzas dinámicas que producen sobre las cimentaciones, tenemos los impactos aislados que se producen en forma irregular, tales como los producidos por martillos, machacadores, parada intempestiva de una máquina, martinets, etc.

ANALISIS DINAMICO

El yunque amortiguador, cimentación y el suelo, constituyen un sistema de dos grados de libertad, como se indica en la figura I-1. El yunque y el bloque de cimentación se suponen rígidos y el amortiguador y el suelo equivalen a resortes elásticos sin masa.

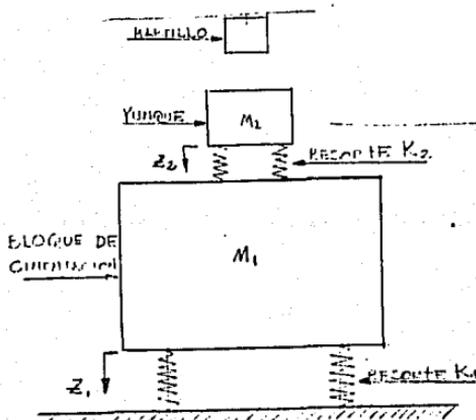


FIGURA I-1

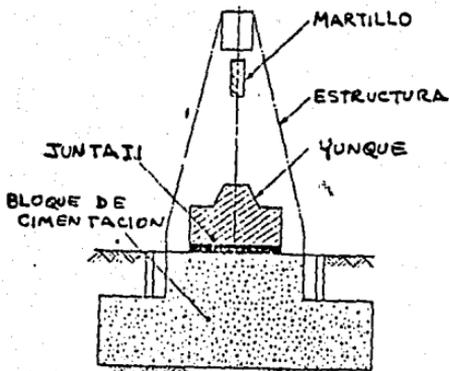


FIGURA I-2
ESTRUCTURA MONTADA
SOBRE LA CIMENTACION

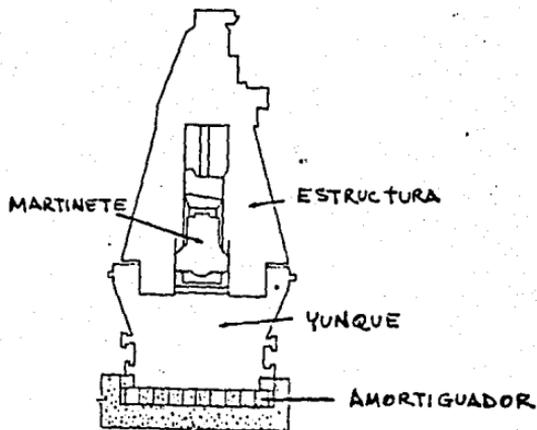


FIGURA I-3
ESTRUCTURA MONTADA
SOBRE EL YUNQUE

Las ecuaciones de movimiento en vibraciones libres, pueden ser escritas en las formas siguientes:

$$M_1 \ddot{z}_1 + K_1 z_1 + K_2 (z_1 - z_2) = 0$$

$$M_2 \ddot{z}_2 + K_2 (z_2 - z_1) = 0$$

Las ecuaciones de frecuencia pueden ser determinadas por las soluciones particulares de las ecuaciones de movimiento.

Siendo $Z_1 = A \text{ sen } Wnt$ y $Z_2 = B \text{ sen } Wnt$.

Tomando las dos frecuencias naturales de la cimentación del martillo, se puede determinar por la solución de esta ecuación de frecuencia.

$Wn_{1,2}$ = frecuencia natural del sistema suelo-cimentación--yunque.

$$Wn_{1,2} = \frac{1}{2} \left[(1+\mu)(W_{na}^2 + W_{nc}^2) \right]^{\pm} \\ \sqrt{\left[(1+\mu)(W_{na}^2 + W_{nc}^2) \right]^2 - 4(1+\mu)(W_{nl}^2 W_{na}^2)}$$

A = Constante arbitraria que depende de las condiciones iniciales del movimiento de la cimentación.

B = Constante arbitraria que depende de las condiciones iniciales del movimiento del yunque.

M1 = Masa de cimentación y estructura, si ésta es montada sobre la cimentación, como en la figura I-2.

M_2 = Masa del yunque (con estructura si ésta es montada sobre el yunque como en la figura I-3).

μ = Relación de masas = $\frac{M_1}{M_2}$

K_1 = $Cu'A$ = coeficiente de rigidez (constante de resorte) del suelo considerado.

Cu' = Cu = coeficiente modificado de compresión elástica uniforme, como un factor multiplicador que regule la relación entre Cu y Cu' usualmente de 1-2 para impacto dependiendo del tipo de suelo.

K_2 $(E/b)XA_2$ = coeficiente de rigidez (constante de resorte) de el amortiguador bajo el yunque.

E = módulo de young del material amortiguador.

b = espesor del amortiguador.

A_2 = área del amortiguador.

Z_1 = desplazamiento de la cimentación de su posición de equilibrio.

\ddot{Z}_1 = aceleración de la cimentación.

Z_2 =desplazamiento del yunque de su posición de equilibrio.

\ddot{Z}_2 =aceleración del yunque.

ω_n =frecuencia natural circular en rad/seg.

ω_{na} =frecuencia circular natural de la cimentación de el-yunque sobre el amortiguador.

ω_{n1} =límite de la frecuencia natural de la cimentación y-yunque sobre el suelo =

" Referencia: PRAKASH "SOIL DYNAMICS"

II COMPORTAMIENTO DEL SUELO

II.1 PROPIEDADES

Para conocer las propiedades del suelo es conveniente considerar los siguientes elementos:

Densidad de masa = ρ

Relación de Poisson = ν

Módulo de deformación recuperable, de Young o de elasticidad = E

Coefficiente de compresión elástica uniforme = C_u

Módulo de rigidez = G

La densidad de masa ρ es igual al cociente de su peso volumétrico en estado natural, entre la aceleración de la gravedad. Es importante hacer notar que la densidad de masa en problemas de dinámica de suelos no se debe confundir con la densidad de sólidos del suelo que es siempre mayor. En la densidad de masa se toman en cuenta los huecos del suelo que pueden contener la fase líquida y fase gaseosa del mismo.

Relación de Poisson. Para la determinación de la relación de Poisson existen varios procedimientos; para obtenerlo se puede hacer en la forma siguiente:

- a) Determinar el módulo de elasticidad E como se indica en el subinciso siguiente.
- b) Realizar una prueba de compresión confinada (bajo condiciones de deformación lateral nula) con lo que se determina el módulo de deformación confinada.

$$M_c = \frac{\sigma_2}{\epsilon_2}$$

Donde σ_2 denota el esfuerzo vertical y ϵ_2 la deformación unitaria vertical inmediata.

- c) Calcular la relación de Poisson mediante la expresión.

$$v = -\frac{M_c - E}{4 M_c} - \sqrt{\left(\frac{M_c - E}{4 M_c}\right)^2 + \frac{M_c - E}{2 M_c}}$$

Si no se dispone de los resultados de una prueba de compresión confinada se pueden utilizar valores de la relación de Poisson comprendidos entre 0.45 y 0.50 para arcillas saturadas y entre 0.30 y 0.35 para arenas. Mientras más densa es la arena, mayor su relación de Poisson.

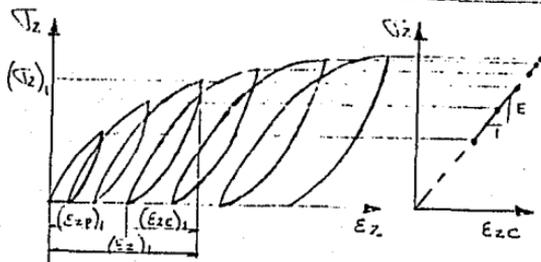


Fig. II-1 Determinación del módulo de deformación recuperable de un suelo

Módulos de elasticidad y rigidez. Existen por lo menos 4 definiciones aplicables a la determinación de un módulo de deformación, relacionado con la respuesta elástica de los suelos a cargas repetidas. Para fines de diseño de cimentaciones de maquinaria, se obtienen buenos resultados utilizando el módulo de deformación recuperable.

Este módulo es la pendiente E de la curva esfuerzo axial (σ_2), contra deformación axial recuperable (ϵ_{2e}), determinada como se indica en la figura II-1. El módulo E puede obtenerse en el laboratorio, a partir de pruebas de compresión triaxial con carga repetida.

La deformación axial recuperable, resulta de sustraer a la deformación total, la deformación remanente en cada ciclo. Se recomienda utilizar el valor medio de E , determinado mediante pruebas triaxiales con presión confinante similar a la del suelo in situ, en probetas inalteradas del material que se encuentra desde el nivel de desplante de la cimentación, hasta una profundidad de 1 1/2 veces la dimensión máxima de la base. En suelos con permeabilidad mayor, que aproximadamente 10 cm/seg., estas pruebas deben ser no drenadas con presión confinante efectiva al principiar el incremento de ($\sigma_1 - \sigma_3$) igual a la presión confinante in situ.

Sin gran error, se pueden utilizar los valores de la relación de Poisson recomendados en el subinciso anterior, y calcular el módulo de deformación recuperable, a partir del coeficiente de compresión elástica uniforme, C_u , determinado mediante pruebas de campo, consistentes en carga y descarga de placas rígidas colocadas al nivel de desplante de la cimentación. Como se indica en la figura II-3. El coeficiente de compresión elástica uniforme, es la pendiente de la curva de esfuerzo vertical (σ_z), contra asentamiento vertical recuperable. (δ_{ze}). Para placas cuadradas de área A, el módulo de deformación recuperable estará dado por:

$$** \quad E = \frac{(1-\nu^2) \sqrt{A}}{1.13} C_u$$

Como hay cierta discrepancia relativa a la dependencia de C_u , del área de la placa, es conveniente utilizar cuando menos dos dimensiones diferentes de placas cuadradas. (Por ejemplo, 60X60 cm. 1.20X1.20 m.) y extrapolar los resultados.

Tanto en las pruebas de laboratorio, como en las prue

bas de campo, se recomienda que el esfuerzo vertical máximo sea del orden de una y media veces la presión estática que se presentará bajo la cimentación real. Se debe llegar a este esfuerzo en unos 10 incrementos de carga, y se recomienda reducir los efectos de histéresis, aplicando cuando menos cuatro ciclos de carga y descarga total, en cada incremento del esfuerzo.

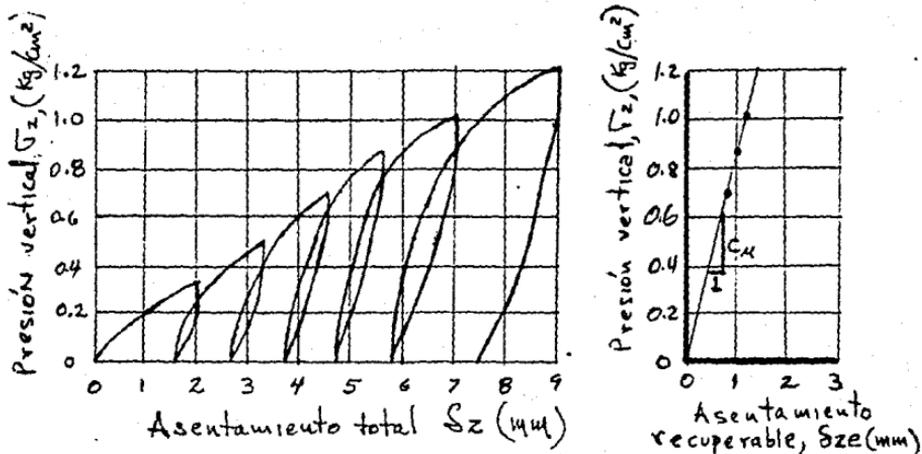
El módulo de rigidez se puede determinar a partir de la expresión.

$$G = \frac{E}{2(1+\nu)}$$

G = MODULO DE RIGIDEZ

E = MODULO DE YOUNG

ν = RELACION DE POISSON



* FIG. II-2 DETERMINACION DEL COEFICIENTE DE COMPRESION ELASTICA UNIFORME C_x

Algunos experimentos nos enseñan que el tamaño del grano de las arenas, tiene comparativamente menor influencia sobre el módulo de Young. Se presenta los siguientes valores de módulo de Young, obtenidos para arenas con diferente tamaño.

** Tabla valores de módulo de Young para diferentes tamaños de arena.

Tamaño de grano de arena, mm	E, Kg/cm ²
1.25-1.50	450
1.00-1.25	520
0.60-0.80	620
0.35-0.60	400
0.30-0.35	420
0.20-0.30	500

Se presenta a continuación los módulos de Young, calculados de el coeficiente de compresión elástica uniforme, para diferentes tipos de suelos; los valores de E fueron fundamentados como un resultado de un ensayo de campo y de investigaciones en laboratorio.

** Tabla: Valores del módulo de Young para diferentes tipos de suelos.

Descripción del suelo	E, Kg/cm ²
Arcilla plástica lodosa con arena y lodo orgánico.	310
Arcilla lodosa ennegrecida saturada con arena.	440
Arcilla lodosa densa con algo de arena.	2,950
Arena medio húmeda.	540
Arena gris con grava.	540
Arena fina saturada.	850
Arena mediana.	830
Légame fino (cieno).	1,000-1,300

Los valores precisos del coeficiente de compresión elástica uniforme (C_u), justo como el módulo de Young y la relación de Poisson, depende de un número de factores,

cuya influencia en cada caso distinto hacen muy ardua la evaluación. Por lo tanto, en la práctica de la construcción, es complicada la edificación de un número suficientemente grande de cimentación para maquinarias sujetas a cargas dinámicas, investigaciones especiales de las propiedades elásticas del suelo son necesarias en el lugar de la construcción. Algunas veces estas investigaciones no pueden ser llevadas fuera. Por lo tanto, sucede frecuentemente que al diseñar una cimentación de maquinaria, se toman valores del coeficiente de compresión elástica uniforme, seleccionados sobre las bases de datos seguros de pruebas efectuadas en suelos similares de otros lugares de construcción.

Los valores del coeficiente de compresión elástica uniforme, obtenidos en cimentaciones probadas con áreas de base menores que 10 metros², serían después recalculados por medio de la ecuación (4) para una área de 10 metros².

$$\text{Ec. 4} \quad C_{M2} = C_{M1} \sqrt{\frac{A_1}{A_2}}$$

En la tabla C, tenemos valores tentativos de (C_u), para cuatro tipos de suelos.

Esta tabla se incluye en las instrucciones oficiales para el diseño y construcción de cimentación de maquinaria.

** Tabla C: Valores de diseño recomendables del coeficiente de compresión elástica uniforme (C_u).

Categoría del grupo de suelo	Grupo de suelo	Carga permisible en el suelo bajo la acción de solo carga estática, Kg/cm^2	Coeficiente de compresión elástica uniforme (C_u), $-Kg/cm^2$
I	Suelo débil (Arcillas y arcilla lodosa con arena, en estado plástico; Arcillosas y arenas arcillosas, además suelos de categoría II y III, con estratificación de lodo orgánico y de turba).	Arriba de 1.5	Arriba de 3
II	Suelos de media resistencia (Arcillas y arcillas lodosas con arena, junto al límite plástico, arenas).	1.5-3.5	3-5
III	Suelo resistente (Arcillas y arcillas lodosas con arena de consistencia dura; Grava y arena-gravosa, légamo y tierra vegetal leguminosa).	3.5-5	5-10
IV	Rocas.	Superior a 5	Superior a 10

Referencias:

*NIETO-RESERDIZ "CRITERIOS DE DISEÑO PARA CIMENTACIONES DE MAQUINARIA"

†BARLAN "DYNAMICS OF PILES AND FOUNDATIONS"

II.2 PRUEBAS

a) PRUEBAS DE CAMPO.

Las pruebas de campo más usuales son:

- 1) Pruebas de carga y descarga en placas rígidas.
- 2) Medición de vibración en los bloques de cimentación de compresoras en operación.
- 3) medición de velocidades de propagación de onda superficiales.
- 4) Sondeos alterados y mixtos en sitios selectos.

1) PRUEBAS DE CARGA Y DESCARGA EN PLACAS RIGIDAS

El objeto de estas pruebas es la determinación del coeficiente de compresión elástica uniforme (C_u). A partir de este coeficiente, podemos determinar el valor del módulo de deformación recuperable E.

- 2) MEDICION DE VIBRACIONES EN LOS BLOQUES DE CIMENTACION DE COMPRESORAS EN OPERACION

Las componentes de aceleración medidas en varios puntos del bloque de cimentación de una máquina una vez integrada permiten conocer la amplitud de los desplazamientos lineales y angulares del bloque, lo cual lleva directamente a una determinación más confiable de las fuerzas y momentos de desbalanceo.

3) MEDICION DE VELOCIDADES DE PROPAGACION DE ONDAS SUPERFICIALES

Las aceleraciones medidas en el terreno a diferentes distancias de un foco de perturbación permiten determinar tanto la velocidad de propagación de ondas superficiales como el coeficiente de absorción de energía en el suelo. La velocidad de propagación de ondas superficiales lleva a una segunda estimación de las propiedades elásticas del suelo.

4) SONDEOS ALTERADOS Y MIXTOS EN SITIOS SELECTOS

Los sondeos alterados y mixtos permiten determinar la estatigrafía y la compacidad relativa del suelo y obtener muestras alteradas e inalteradas para efectuar con ellas las pruebas de laboratorio.

Para medir las vibraciones inducidas por compresoras en operación y para determinar velocidades de propagación de ondas superficiales, se utilizan acelerómetros cuya señal se registra en un oscilógrafo. También se utilizan sismógrafos.

Los acelerómetros permiten captar simultáneamente las vibraciones en diversos puntos del bloque de cimentación en una máquinas en varias máquinas a la vez, y en puntos del terreno a diferentes distancias del foco de perturbación.

Las pruebas que anteriormente se enumeraron se hacen generalmente para comparación, tratando de encontrar características adecuadas para el diseño de futuras cimentaciones, haciendo un paralelismo entre una máquina en operación y la instalación de máquinas futuras, el tipo de máquinas instaladas y las máquinas por instalar. Y las características del suelo donde están cimentadas por los del suelo donde futuramente se cimentarán.

B) PRUEBAS DE LABORATORIO

Las pruebas de laboratorio que se realizan comunmente sobre las muestras obtenidas son:

- 1) Clasificación de los materiales.
- 2) Determinación de contenidos de agua y límites de consistencia.
- 3) Granulometrías.
- 4) Pruebas triaxiales.
- 5) Pruebas de vibración torsional libre.

1) CLASIFICACION DE LOS MATERIALES

Debido a la gran variedad de suelos, la mecánica de suelos ha desarrollado algunos métodos de clasificación. Cada uno de estos métodos tiene su campo de aplicación según la necesidad y uso que los haya fundamentado. Tenemos la clasificación por tamaño de partículas (American Association State Highway Officials) Clasificación de la Administración Aeronáutica Civil (C.A.A.), El Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (S.U.C.S.).

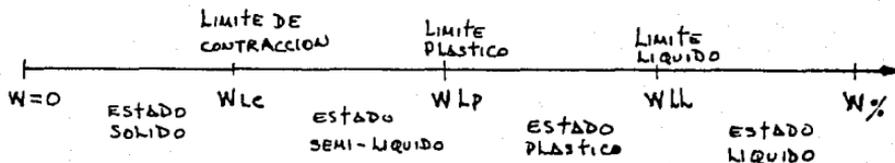
El Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (S.U.C.S.) es el que mejor satisface los diferentes campos de aplicación de la mecánica de suelos. Con este sistema hare

mos la clasificación del suelo y la descripción de los sondeos.

2) DETERMINACION DEL CONTENIDO DE AGUA Y LIMITES DE CONSISTENCIA

Las muestras obtenidas en los sondeos se clasificarán en secas y húmedas de acuerdo al Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (S.C.U.S.).

Para determinar los límites de consistencia empleamos suelo que pase por la malla No. 40.



3) GRANULOMETRIAS

El conocimiento de la composición granulométrica de un suelo grueso sirve para discenir sobre la influencia que puede tener en la densidad del material compactado. El análisis granulométrico nos da la determinación de la can-

tividad en porcentaje de los diferentes tamaños de las partículas gruesas el sistema más sencillo es el tamizado, pero a medida que disminuye el tamaño de las partículas se hace cada vez más difícil por lo que se emplean procedimientos por sedimentación. Luego de conocer la composición granulométrica del suelo, éste se representa gráficamente formando la curva granulométrica.

4) PRUEBAS TRIAXIALES

La prueba de compresión triaxial que utilizaremos es la prueba rápida o sin drenaje dando distintos valores de la presión de confinamiento y varios ciclos de carga y descarga para distintos niveles de esfuerzo desviador, éstas nos darán el valor del módulo de Young E.

$$E = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{\epsilon_{axial}}$$

5) PRUEBAS DE VIBRACION TORSIONAL LIBRE

Para comprobar los resultados de las pruebas triaxiales consolidadas, no drenadas, se llevaron a cabo pruebas

de torsión dinámica con muestras inalteradas de arcillas de alta y baja plasticidad.

Las pruebas consisten en someter a vibración torsional libre el espécimen de arcilla. Sujeto en sus extremos por mordazas: una de ellas está fija en la parte superior y la otra queda solidariamente unida a la probeta. Sobre la mordaza inferior se aplica un momento torsionante que produce un giro inicial: al eliminar súbitamente dicho momento la probeta queda oscilando libremente. La vibración así inducida se registra mediante un oscilógrafo y los registros obtenidos muestran una curva típica de vibración amortiguada. El período de oscilación, se calcula midiendo el tiempo transcurrido entre la primera y la última oscilación. Y dividiéndolo entre el número de ciclos.

El módulo de rigidez, $G = 2E(1-\nu)$, donde E es el módulo de Young y ν la relación de Poisson del material es igual al:

*

$$G = \frac{0.41 \times 10^3 (4.539.18 \times 10^{-6}) + \frac{1}{3} \left(\frac{1}{29} \times h \times r^2 \right)}{d^4 T^2}$$

Siendo:

g Aceleración de la gravedad = 9.81 cm/seg.

γ_n Peso volumétrico húmedo del material probado. Kg/cm.

V Volúmen de la masa de suelo oscilante. cm.

r Radio de la probeta. Cm.

d Diámetro de la probeta. cm.

L Longitud de la parte oscilante de la probeta, cm.

T Período de oscilación seg.

*Referencia:

ALBERRO-NIETO "APENDICE A CRITERIOS DE DISEÑO PARA CIMENTACIONES DE MAQUINARIA".

II.3 EFECTOS DE LAS VIBRACIONES

Los estudios, observaciones de modelos y de cimentaciones existentes sujetos a impactos y vibraciones demuestran que pueden aguantar asentamientos más largo tiempo que aquellos impuestos por cargas estáticas. Por eso sucede generalmente que los asentamientos de las cimentaciones aguantan excelentemente las vibraciones, pero ponen en peligro la seguridad de la estructura un efecto extremadamente adverso es producido por las vibraciones de cimentaciones bajo máquinas y en particular bajo martinetes. Esas vibraciones dirigidas a asentamientos no solo de las cimentaciones de martinetes, sino también de las bases bajo las columnas o muros del edificio donde está situado el martinete. Las deformaciones considerables de la superestructura resultan con frecuencia que ponen en peligro la seguridad y estabilidad de todo el edificio.

Se considera que los asentamientos residuales causados por una acción conjunta de cargas estáticas y vibraciones parece frecuentar particularmente cuando la cimentación descansa sobre suelos no cohesivos semejantes a arenas saturadas, igual pasa en las arenas que se caracterizan por su bajo valor de porosidad. Investigaciones estáticas de esos suelos bajo pruebas de carga o en un consolidá-

tro demuestran que poseen altos valores de resistencia, algunas veces más grande que los correspondientes a valores de suelos cohesivos tales como arcillas plásticas. Por eso las arenas de mediana y alta densidad son consideradas buenas bases naturales. Esto es cierto, sin embargo, solo para cargas estáticas. Si una arena u otro suelo no cohesivo están sujetas simultáneamente a cargas estáticas y vibraciones (o impactos), entonces, como nos demuestra la experiencia con construcciones industriales, la resistencia a cargas externas decrece considerablemente.

Esto es verificado experimentalmente hundiendo en el suelo vibradores, pilas vibrando, tubos, o cilindros con diámetros considerables. Los asentamientos de cimentaciones con vibración, así como la penetración de los elementos estructurales en el suelo a considerable profundidad, pueden ser observados no solo en suelos no cohesivos, sino también en suelos cohesivos. Por supuesto los efectos cuantitativos de las vibraciones o choques sobre los suelos cohesivos pueden ser mucho más pequeños que en los suelos no cohesivos especialmente en las arenas.

El proceso físico el cual causa cambios en las propiedades del suelo durante las vibraciones (tal como al decremento en resistencia contra las cargas externas princi-

piando el crecimiento del asentamiento residual) no está claro aún.

Algunos experimentos nos demuestran que las vibraciones causan cambios en las propiedades disipativas del suelo, en la fricción interna y la viscosidad en la fuerza de cohesión (las cuales determinan la resistencia inicial del suelo a cortante) en las propiedades hidrodinámicas (tales como en el coeficiente de permeabilidad y en la presión de poro), y las características plásticas y elásticas, tales como el módulo de Young, el módulo y los límites de elasticidad y porosidad.

En suma, eso fue establecido que si se sujeta a vibraciones intensivas, algunos suelos (especialmente las arenas saturadas, lodos y suelos arcillosos), pierden su resistencia a cortante a tal grado que sus propiedades mecánicas son más ajustadas a esos de líquidos viscosos que de sólidos.

Siguiendo esto en los procesos de vibración, todas las propiedades de un suelo pueden sufrir cambios básicos, incluyendo esas propiedades, las cuales gobiernan la resistencia del suelo cargado.

Esto no es posible presentar con un grado suficiente de precisión el valor de el asentamiento residual de una cimentación sujeta a vibraciones o choques. Sin embargo, los datos aprovechables para investigaciones experimentales y teóricas hacen posible evaluar la influencia de factores seguros en los asentamientos de una cimentación y consecuentemente tomar medidas convenientes a asentamiento decrecientes.

III COMPORTAMIENTO DE LA ESTRUCTURA

III.1 TIPOS DE FALLAS

La maquinaria en operación colocada en una estructura o cerca de ella, puede inducir vibraciones capaces de poner en peligro la estabilidad de la estructura o causar daños en los elementos estructurales o decorativos, en las instalaciones y equipo delicado contenido en la misma estructura.

Estas vibraciones transmitidas a través del suelo o provenientes de la misma estructura son de efectos nocivos. Se consideran tres posibles problemas: Asentamientos, resonancia y transmisión de vibraciones.

En el estudio de las vibraciones estructurales inducidas por maquinaria en operación deben tenerse en cuenta posibles problemas, como fallas en los elementos estructurales ocasionados por el incremento dinámico de las cargas, daños en las conexiones de las instalaciones debidas a desplazamientos dinámicos excesivos, y daños en equipo delicado colocado en la estructura o en la misma maquinaria en operación.

Podemos describir los problemas ocasionados por vibraciones inducidas por maquinaria en operación de la manera siguiente:

a) Efectos de impacto o incremento dinámico de las cargas. Las solicitaciones estáticas que gravitan sobre una estructura y que pueden clasificarse como cargas vivas y muertas pueden incrementar considerablemente su valor al generarse fuerzas de inercia debidas a la vibración de la estructura. Aunque las vibraciones no se generen en la estructura misma, las que llegan a ella a través del suelo pueden ocasionar efectos de impacto sobre diferentes elementos estructurales como vigas y losas.

Dichos efectos serán mayores mientras mayor sea la carga estática que gravita sobre los elementos estructurales considerados. En algunos casos pueden ocasionar colapso parcial o total, pero la mayoría de las veces ocasionarán agrietamiento de los elementos estructurales.

b) Incremento dinámico de los desplazamientos. En instalaciones no estructurales, tales como elementos decorativos, particiones, instalaciones de plomería, de acondicionamiento de aire y en otros tipos de tuberías y elementos flexibles, el efecto más importante de las vibraciones de la estructura no es el incremento inercial de las cargas,

ya que estos elementos son generalmente ligeros, sino el incremento dinámico de los desplazamientos. Esto resulta de la flexibilidad de dichas instalaciones, mucho mayor que la de los elementos estructurales a los que están ligadas.

El incremento dinámico de los desplazamientos, que se presenta en la forma de amplitudes excesivas de vibración, puede dar origen principalmente a los tipos de fallas que aparecen a continuación.

I. Rotura de las conexiones de las instalaciones, principalmente donde se encuentran unidas a elementos estructurales más rígidos.

II. Fatiga del material de algunas secciones de las mismas instalaciones o de los elementos que le sirven de liga con la estructura.

III. Daños locales del material de relleno (yeso, cemento, etc.) en las uniones entre la estructura y los elementos decorativos o de partición, no estructurales.

IV. Colapso de elementos decorativos o de partición.

V. Fractura de elementos frágiles como recubrimientos de muros y vidrios de ventanas.

VI. Agrietamiento en juntas de construcción o juntas de dilatación y en impermeabilizantes de azoteas.

VII. Mal funcionamiento de los mecanismos de accionamiento de instalaciones tales como elevadores, compuertas, válvulas, etc.

C) Daños en la misma maquinaria o en equipo delicado alojado en la estructura. A veces, la vibración de una estructura que soporta maquinaria en operación puede producir daños en la misma maquinaria o en elementos flexibles conectados a ella. Este fenómeno generalmente se presenta en combinación con el incremento dinámico de los desplazamientos citado arriba.

En otras ocasiones, las vibraciones que llegan a una estructura pueden dañar equipo o instrumentos más o menos delicados (por ejemplo, relojes, barómetros, máquinas, herramientas, etc.) alojados en la misma estructura. Aún si las vibraciones son demasiado pequeñas para dañar elementos no estructurales e instalaciones especiales por amplitudes excesivas de vibración, debe estudiarse la

posibilidad de daño a equipo delicado o al material frágil alojado en la estructura.

III.2 METODOS DE PROTECCION

Existen muchos métodos para proteger una estructura contra las vibraciones inducidas por maquinaria en operación. Sin embargo, todos ellos pueden clasificarse en alguno de los tres tipos siguientes:

- a) Reducción de las vibraciones en la fuente.
 - b) Aislamiento o impedimento de la propagación de las vibraciones.
 - c) Modificación de las características dinámicas de la estructura o de los elementos asociados a ella.
- a) Reducción de las vibraciones en la fuente.

Existen algunos tipos de máquinas, como martillos, troqueles, prensas, piloteadoras, etc., para las que este método de protección resulta inaplicable: necesariamente deben originar vibraciones intensas. En general estas máquinas operan con régimen transitorio, y las vibraciones a que dan origen son de tipo impulsivo.

En las máquinas que operan con régimen estacionario sí resultan aplicables los métodos de reducción de vibra-

ciones en la fuente. Sin embargo, antes de tomar la decisión de intentar reducir las vibraciones, se necesita saber si éstas son excesivas o si son normales para la máquina en cuestión. Las máquinas de régimen estacionario pueden clasificarse en dos grupos, reciprocantes y rotatorias. En las máquinas reciprocantes, generalmente de menor velocidad, la vibración se debe principalmente a las fuerzas de inercia originadas por los cambios de aceleración en el movimiento de los diferentes elementos de la propia máquina; a saber, movimiento armónico de los émbolos, movimiento plano de las bielas y movimiento de rotación de las manivelas y el volante.

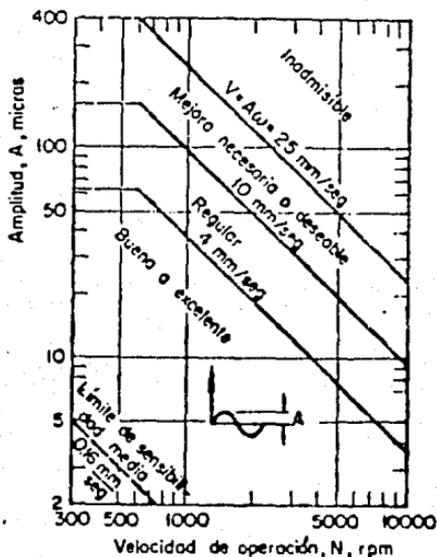
Otra causa de vibración en las máquinas reciprocantes, que también es la causa principal de vibración en las máquinas rotatorias (aunque éstas generalmente son de mayor velocidad), consiste en las excentricidades accidentales en las flechas y en las chumaceras, debidas a defectos de maquinado, falta de homogeneidad del material, errores de alineación o deformaciones estáticas y dinámicas del mismo material. Por ser "accidentales", no se les puede dar un tratamiento analítico riguroso.

Observaciones estadísticas efectuadas en diversos países permiten, por otra parte, determinar en forma direc

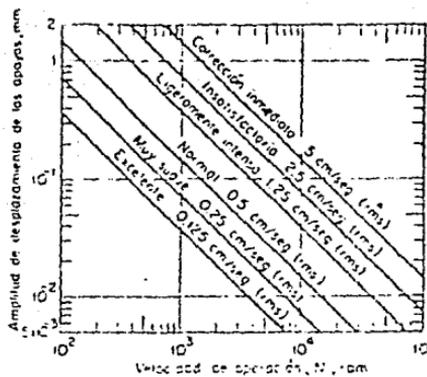
ta cuándo la vibración medida en los apoyos de una máquina es excesiva, o cuándo se encuentra dentro de los límites aceptables.

I. Vibraciones máximas permisibles en las máquinas.

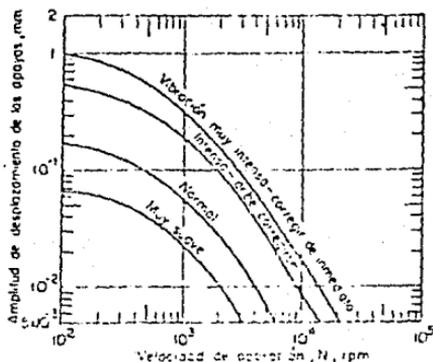
Las gráficas siguientes presentan diferentes criterios que coinciden en lo general, y establecen límites de amplitud permisible de vibración en diferentes máquinas, en función de la velocidad normal de operación de las mismas, N , en rpm.



LÍMITES DE VIBRACION
(C.F.E. "VIBRACIONES MECANICAS")



Tolerancia de vibración de maquinaria (Según T. C. Rathbone, *Power Plant Engineering*)



Tolerancia de vibración de maquinaria (Según H. G. Yates, Trans. *North East Coast Institute of Engineers and Shipbuilders*)

II. Utilidad del balanceo dinámico.

El mejor procedimiento para reducir las vibraciones inducidas por una máquina de régimen estacionario consiste en el balanceo dinámico.

En la tabla A se presentan algunas características del balanceo obtenido, en función de las amplitudes de vibración resultante medidas en las chumaceras de las máquinas. La tabla B suministra información relacionada con el balanceo requerido por diferentes tipos de máquinas, en función del cociente del desbalanceo residual entre el peso del rotor. Este cociente es una medida del desplazamiento del centro de gravedad.

TABLA A

VIBRACIONES MAXIMAS PERMISIBLES EN LAS CHUMACERAS DE LAS MAQUINAS (SEGUN MAJOR).

Tipo de balanceo	Doble amplitud (mm)	
	N = 3000 rpm	1500 rpm
Excelente	0.02	0.04
Bueno	0.04	0.05
Regular	0.06	0.10
Insatisfactorio	0.10	0.16
Inadmisible	> 0.10	> 0.16

TABLA B

GUIA DE LA CALIDAD DE BALANCEO REQUERIDO POR DIFERENTES MAQUINAS (SEGUN MUSTER).

Tipo de rotor	Desbalanceo residual (mm-g) Peso del cuerpo del rotor (Kg)	Desplazamiento del centro de gravedad (mm) $\times 10^{-3}$
---------------	---	---

Rotores giroscópicos de alta velocidad, armadura, flechas y volantes de máquinas de pulido fino.

0.2 - 1.0

Armaduras de motores pequeños de muy alta velocidad, turbinas de gas medianas y pequeñas, sopladores supercargadores de alta velocidad, sistemas motrices de máquinas pulidoras

0.5 - 2.5

Armaduras rígidas de motores pequeños, sopladores supercargadores, turbinas, turbogeneradores.

2 - 10

Armaduras de motores eléctricos comerciales, ventiladores, componentes de máquinas, herramientas, piezas de engranes de alta velocidad, cigüeñales de motores de cuatro cilindros o más, partes de alta velocidad de técnicas de procesos.

5 - 25

Flechas de hélices de barcos, cigüeñales de motores de uno, dos o tres cilindros (en los que no se pueden balancear las fuerzas debidas a las masas recíprocas), motocicletas, llantas, ruedas, partes de ovimiento lento de máquinas trituradoras, máquinas textiles, tambores de trilladoras, etc.

20 - 100

b) Aislamiento o impedimento de la propagación de las vibraciones.

Este se puede lograr por medio de alguno de los siguientes procedimientos:

- I. Alejamiento de la fuente de vibración.
- II. Creación de discontinuidades en la trayectoria de las ondas vibratorias.
- III. Amortiguamiento de la vibración transmitida.
- IV. Absorción mecánica de la misma vibración.

En la sección III-4 aislamientos y amortiguadores se tratará este tema más detalladamente.

c) Modificación de las características dinámicas de la estructura o de los elementos asociados a ella.

La modificación de las características dinámicas del sistema resulta conveniente cuando se presentan fenómenos de resonancia, es decir, cuando alguna de las frecuencias dominantes de la sollicitación coincide con cualquiera de

las frecuencias naturales de la estructura o de algún elemento de la misma.

También puede aplicarse este concepto a la modificación tanto de la estructura que soporta la maquinaria en cuestión como de su cimentación.

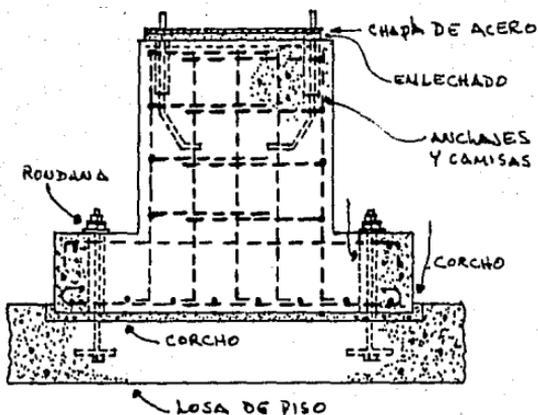
Es posible modificar las características dinámicas de una estructura (masa, rigidez, amortiguamiento), con objeto de disminuir el efecto que sobre la misma puedan producir las vibraciones inducidas por maquinaria en operación en la misma estructura o en su vecindad. Conviene enfatizar la importancia de alejar las frecuencias naturales de vibración en la estructura o en determinados elementos estructurales, de las frecuencias dominantes de operación de la maquinaria en cuestión.

III.3 TIPOS DE ANCLAJE

Para el montaje de máquinas o naves industriales sobre sus respectivas cimentaciones es necesario que se tenga una unión firme para aguantar todo tipo de esfuerzos a que estén expuestos, ésto se logra mediante los sujetadores llamados también anclas.

Hay un número variado de anclajes los cuales se escogen dependiendo del tipo de unión que se quiera entra la cimentación y la máquina o entre la cimentación y la nave industrial tratando de que la solución sea la más económica, segura y práctica.

CIMENTACION CON ANCLAS PARA EL
MONTAJE DE MAQUINAS



Se presenta una descripción de los tipos y detalles de pernos de anclaje y manguitas tubulares llamadas comúnmente camisas además de los procedimientos para formar los lechos de asiento de placas de base.

I) Pernos de anclaje.

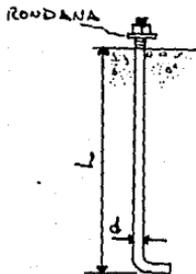
Si un perno de anclaje ha de trabajar a tracción, su enlace con el concreto ha de ser adecuado. Un redondo liso recto embebido dentro del concreto puede que no tenga la suficiente adherencia para evitar que la barra se arranque o que gire al intentar aflojar una tuerca muy oxidada. Cuando un perno de anclaje no está completamente embebido en el concreto la corrosión puede afectar mucho al extremo que se queda fuera, por consiguiente, la sección peligra en el arranque de la rosca deberá ser dimensionada de manera que la máxima tracción que haya de resistir solamente sea de 840 a 1,120 kg/cm². Generalmente conviene colocar una fuerte rondana bajo la tuerca; y a veces, se usa doble tuerca cuando interesa dejarlas fijas en su sitio. En algunas ocasiones, se utilizan pernos con topes cuando hay que resistir tracción, pero la unión debe tener suficiente holgura para permitir un ligero movimiento lateral de las partes conectadas. No deberá confiarse

en el ligero apriete de una tuerca que un operario hace para dejar que ésta pueda tener un cierto movimiento de deslizamiento; generalmente, la dejará apretada a fondo. Son preferibles las tuercas exagonales a las cuadradas, por que pueden accionarse más fácilmente por medio de una llave en los espacios reducidos.

Con referencia a los tipos de anclaje que se representan en las figuras siguientes pueden hacerse los siguientes comentarios:

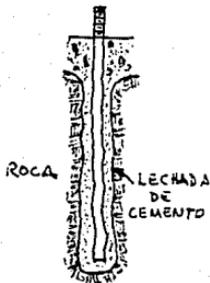
a) Este perno va doblado en forma de patilla para aumentar el anclaje y evitar el giro. La longitud de la patilla será de 4 a 6 diámetros.

La longitud de la parte embebida L será por lo menos de 40 diámetros, o mayor en caso de utilizarse para máquinas sometidas a cargas de tracción instantáneas o repetidas.



a) PERNO CON
PATILLA

b) Para los pernos de anclaje se utilizan casi necesariamente redondos lisos. Sin embargo, un redondo de esta clase puede transformarse, en frío o bien calentándolo, en un perno arponado. Este tipo de perno es útil cuando ha de introducirse en orificios practicados en roca o concreto que después se rellenan con lechada de cemento. Debido al peligro de que queden bolsas de aire que impidan un perfecto enlechado, muchas veces conviene rellenar primeramente el orificio con la lechada de cemento y después introducir el perno de anclaje forzándolo hasta dejarlo en su posición correcta. Lo que ha de evitarse al disponer estos anclajes en orificios previamente perforados, es la presencia de fisuras o grietas que pueden limitar la resistencia del perno de anclaje a la que ofrezca el peso de un volumen de roca relativamente pequeño. El diámetro del orificio perforado será por lo menos de 7.5 cm. o de 3 a 4 diámetros y su profundidad deberá ser de 40 a 60 diámetros de la barra.



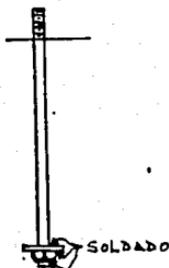
b) PERNO
ARPONADO

c) Este perno con incisiones tiene un empleo semejante al que se representa en (b). Sin embargo, generalmente es más sencillo de realizar el primero.



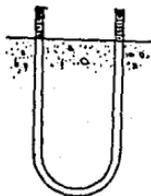
c) PERNO CON
INCISIONES

d) Rara vez se pueden utilizar pernos de anclaje pequeños y cortos con la cabeza que normalmente llevan éstos. Este dibujo muestra un redondo con rosca en ambos extremos que sustituye a aquéllos. La rondana ha de resistir el arranque, la tuerca es para sostener la rondana, y la soldadura es para evitar el giro del redondo. Generalmente, este perno es más costoso que el (a).



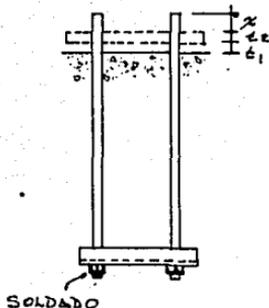
d) REDONDO CON
ROSCA

e) Cuando dos pernos van situados muy cerca uno de otro, lo que parece más conveniente es doblar un redondo en forma de U con roscas en los extremos. Sin embargo, es difícil construirlos de forma que queden exactamente derechos, y también, es necesario dejarlos profundamente embebidos cuando el concreto o la armadura han de resistir tracciones elevadas.



e) PERNO EN U

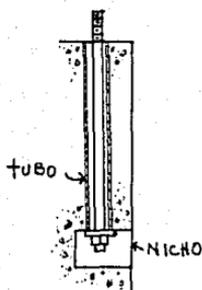
f) Pueden enlazarse dos redondos mediante una pieza transversal, como muestra este croquis. Conviene hacer las soldaduras como se indica en (d). En todos los casos, la longitud del roscado y la de parte que sobresale del concreto serán las adecuadas. Aquí, t_1 es la altura que corresponde al enlechado; t_2 , la que hay que dejar para fijar la estructura metálica; y x , la que hay que prever para rondanas y tuercas más la longitud necesaria para maniobrarlas.



f) REDONDO ROSCADO
CON ANCLAJE COMUN

g) En el caso de las máquinas, los pernos de anclaje puede que tengan que ser desmontables. El croquis representa un redondo roscado que se prolonga a través de un manguito tubular hasta un alojamiento a modo de nicho donde puede maniobrase para enganchar una rondana y una tuerca. Cuando las máquinas van ancladas o losas de pisos o vigas, los tubos pueden atravesar el concreto de un lado a otro, de manera que los redondos pueden introducirse desde arriba o desde abajo. Si no se hace esto, hay que estar seguro de que los pernos podrán introducirse desde arriba después que la máquina quede montada. Otro tipo de perno de ancla

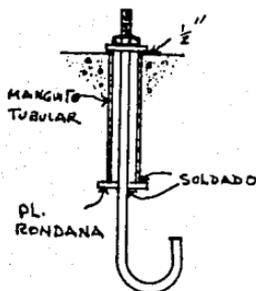
je desmontable lleva una pequeña cabeza en forma de martillo. Este puede colocarse transversalmente a una ranura dispuesta en una pieza embebida, después se gira 90° y queda alojado en su posición al apretar para sujetarlo.



g) REDONDO
ROSCADO
Y NICHOS

h) Es un dicho antiguo que si los pernos de anclaje no están correctamente colocados la estructura no quedará fija. Este croquis muestra un redondo con un gancho a 180° , rara vez necesario, y un manguito tubular. Este último sirve para permitir que el perno tenga un cierto movimiento moderado con objeto de encajar los orificios de la base que ha de fijarse. La rondana sirve para tapar el fondo del tubo evitando que penetre el concreto fluído durante el colado; la soldadura sirve para sujetar la rondana y manguito manteniéndolos en la posición correcta; el saliente de 13 mm. sirve para que el manguito tubular sobresalga del nivel del concreto moldeado, pero deberá ser considerablemente menor que la tolerancia de ajuste para el enlechado. La rondana y tuerca pueden utilizarse temporalmente para evitar que el concreto penetre dentro del manguito. El anclaje efectivo del perno es solamente la parte que queda por debajo del manguito tubular. Los tubos de cartón y envolturas de papel empleado son generalmente malos substitutivos de los manguitos tubulares metálicos, excepto en casos tales como el que se indica en el croquis (g). Sin embargo, los manguitos cónicos de chapa metálica son muy útiles y económicos dejándoles bien ajustados alrededor de los pernos de anclaje en su parte inferior. Durante el colado puede taparse provisionalmente con tacos anulares de madera la parte superior de los conos invertidos

para impedir que penetre el concreto fluído.



h) REDONDO CON GANCHO
Y MANGUITO TUBULAR

i) Este croquis muestra otros procedimientos para taponar los extremos de los manguitos tubulares. Evidentemente, el anillo de borra de algodón es ineficaz y no ofrece garantía, y las rondanas de madera pueden desprenderse al apisonar el concreto. La tercera ilustración muestra un dispositivo para los pernos de anclaje que necesariamente tienen que ser relativamente cortos. En este caso, la gran placa de la rondana tiene que soportar la tracción del perno, excepto la absorbida por adherencia en la parte exterior del tubo. Si la tuerca no va soldada al redondo, este perno puede desenroscarse, sacarse y después reempla-

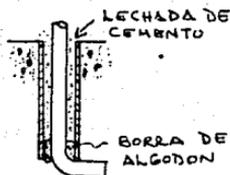
zarse. Sin embargo, si la rosca se deteriora, estas operaciones no pueden realizarse y las medidas para remediarlo son difíciles.



1) SISTEMAS DE TAPONAR LOS MANGUITOS TUBULARES DURANTE EL CCLADO

j) Este croquis muestra los resultados absurdos que pueden obtenerse cuando se sigue al pie de la letra el dicho: si parte de una cosa es buena, toda ella será aún mejor. Para precisar, los manguitos tubulares largos permiten torcer con más facilidad un perno de anclaje lateralmente que los manguitos cortos. Sin embargo, si están embebidos en el concreto una longitud pequeña y limitada, el anclaje

del propio perno puede ser ineficaz. Como aquí se indica, el gancho no puede proporcionar el anclaje apropiado debido a que su resistencia como voladizo es relativamente escasa y su longitud demasiado pequeña para desarrollar una resistencia de adherencia apreciable.

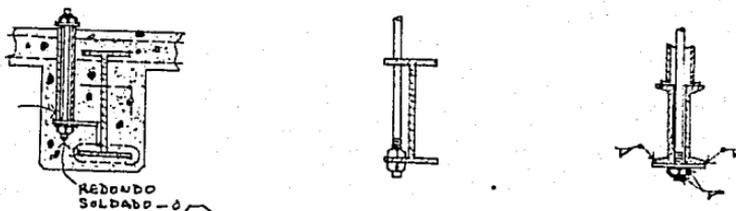


j) ANCLAJE
INEFICAZ

k) Este dibujo muestra unos cuantos detalles que tienen su aplicación cuando los pernos de anclaje de máquinas van directamente unidos a la estructura metálica. En la primera ilustración, se evita la soldadura de montaje metiendo un redondo, con rosca en su parte superior, a través de un orificio practicado en el angular del asiento, después

se deja caer el manguito tubular y la rondana de centrado sobre el perno, y finalmente se aprieta la tuerca para que el conjunto quede fijo durante el colado. El redondo transversal de la parte inferior sirve para evitar que gire el perno cuando la maquinaria se monta o se mueve. En el segundo croquis, la tuerca y la parte de abajo de la rondana vendrán soldados al perno desde el taller, después puede soldarse en obra la parte de arriba de la rondana, pues la soldadura del fondo es más difícil. Cuando el hierro va sin recubrir, es necesario realizar cierta unión física para que el perno se mantenga fijo, salvo en el caso en que se suponga que ha de ser desmontable; cuando la maquinaria o la estructura metálica va a ir colocada sobre su parte superior, cualquier golpe puede hacer que éste desaparezca al hundirse o que se rompa. En el tercer croquis se supone que las dos tuercas mantienen al perno fijo en su posición. Este sistema, con distintas modificaciones, pueden utilizarse cuando hay que montar los pernos desde arriba.

K) DETALLES DE LOS PERNOS DE ANCLAJE DIRECTAMENTE UNIDOS AL ENTRAMADO METALICO



- 1) Generalmente es esencial utilizar una especie de plantilla de madera o metálica para mantener los pernos de anclaje en su posición correcta, tanto horizontal como vertical, durante el vertido del concreto. Este croquis representa un procedimiento sencillo a fijar los pernos de anclaje a un pedestal que va a sonortar una columna metálica. Al plantear los detalles de la estructura hay que procurar que si se disponen cuatro pernos de anclaje las distancias entre éstos sean, en ambas direcciones, o completamente iguales o desigua

les de forma totalmente evidente. Por ejemplo, si la separación en una dirección es 13 mm. más pequeña que en la otra, los montadores pueden fácilmente correr el error de girar el conjunto 90° de la posición prevista. Además, deberá estudiarse el montaje de manera que la variedad de modelos y separaciones sea mínima. Ha habido casos en que el colocar en un lugar determinado un grupo de pernos equivocado ha supuesto, la necesidad de picar el concreto, curvar o calentar los pernos, soldar una prolongación acodada, taladrar orificios y añadir pernos para ensanchar la base, o incluso el tener que prescindir de parte o todo el sistema de montaje con los pernos de anclaje previstos. En cualquier caso, las plantillas para montaje deberán ser resistentes, de fácil colocación, estar bien apoyadas, que no se alteren al colar, y hechas de forma que permitan al perito mecánico o a cualquier otro individuo, colocar los pernos correctamente.

Si se puede asegurar con precisión la situación de los pernos de anclaje, desaparecerá la necesidad de emplear los molestos manguitos tubulares, puesto que generalmente los orificios que ha de llevar la otra parte metálica del montaje se pueden realizar en taller con toda exactitud. Los manguitos tubulares se utilizan cuando ha de tenerse en cuenta la imprecisión de los trabajos a pie de obra.

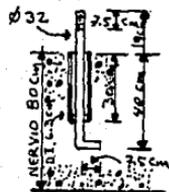
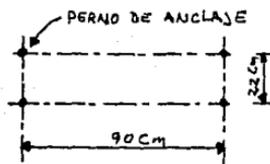


1) DISPOSICION DE UNA PLANTILLA PARA
MANTENER FIJOS LOS PERNOS DE ANCLAJE
DURANTE EL COQUEADO

La figura III-1 muestra las circunstancias generales en que estaban los pernos de anclaje extremos del apoyo principal de un gran equipo transportador metálico que en cierta ocasión hubo que arrancar. La fuerza de tracción dio lugar a un tirón hacia arriba de los pernos A; y la primera vez que la máquina trabajó con toda la carga, estos pernos se rompieron. Después hubo que perforar orificios a través de las vigas de concreto armado situadas bajo los apoyos y colocar pernos pasantes todo esto con un gasto considerable y pérdida de producción.

FIGURA III-1

DETALLES DE LOS PERNOS DE ANCLAJE
QUE SE ARRANCARON



otro caso desafortunado es el que se representa en la figura II-2. Este ilustra la dificultad que puede acarrear el poco conocimiento de estos problemas. Una columna cilíndrica de 1.50 m. de diámetro estaba dispuesta para soportar la maquinaria que accionaba el equipo giratorio de un depósito de decantación de 30 m. de diámetro. El equipo iba sujeto a la parte superior del anillo de concreto. El que desarrolló el proyecto se dió cuenta de que era esencial dejar una junta de concreto en A. Pensó que sería económico colar el cuerpo principal y después colocar los

pernos de anclaje en la parte superior de este concreto antes de colar el anillo. (Esto era contrario a los métodos especificados). Cuando la maquinaria se puso en marcha, el gran par de torsión horizontal rompió por esfuerzo cortante el anillo en A.

Era imposible que los extremos de las siete barras verticales b fueran adecuadas para sujetar el anillo y mantenerlo en su sitio y, por supuesto, la barra circular a era meramente un anillo separador. La economía final fué lo que costó desmontar todo el equipo completo, cortar 1,05 m de la parte superior de la columna, montar unos pernos de anclaje largos, aumentar la cuantía de la armadura, verter más cantidad de concreto, y un importante retraso en la puesta en marcha de la producción. Además, hubo que hacer la misma operación en un segundo depósito que estaba al lado del que había fracasado.

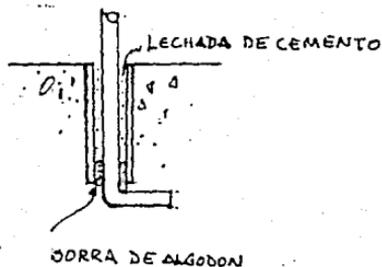


FIGURA III-2

COLUINA DE APOYO ROTA POR MAL
EMPESTRADO DE LOS PERNOS

Si el espacio que queda alrededor de un perno de anclaje que está metido dentro de un manguito tubular se deja vacío puede penetrar el agua dando lugar a cierta corrosión y si la estructura está expuesta a la helada, puede resultar un agrietamiento del concreto. Es conveniente en estas circunstancias rellenar el manguito con lechada de cemento como se representa en la figura III-3.

FIGURA III-3



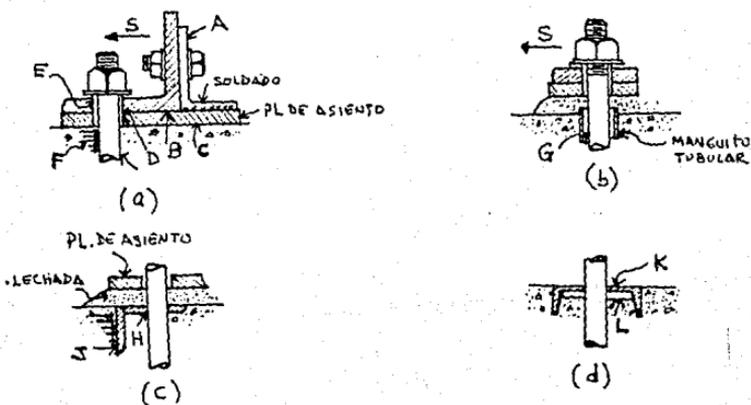
PERNO DE ANCLAJE CON CAMISA

Los pernos de anclaje que tengan que resistir grandes esfuerzos cortantes transversales requieren una atención especial por parte del que desarrolla el proyecto. En la mayor parte de las estructuras corrientes, las cargas verticales serán lo suficientemente grandes para que la resistencia de rozamiento bajo la presión sea capaz de contrarrestar todas las fuerzas laterales probables. En el caso de máquinas y algunas estructuras especiales, pueden existir grandes fuerzas de corte transversales aplicadas a los pernos de anclaje.

Como se indica en la figura III-4, los orificios en la estructura metálica tienen un diámetro de 6 a 12 mm. mayor que el de los pernos de anclaje. Si la estructura o entramado va sujeto a una placa de base por medio de un empalme adecuado A, el esfuerzo cortante S se transmitirá a esta placa sin que el perno de anclaje intervenga. De lo contrario, se produce un deslizamiento, tanto a lo largo de la superficie B como de la C, hasta que el espacio D se cierra y el perno ofrece resistencia. Sin embargo, esta resistencia es probable que dependa de la resistencia local a compresión de la lechada o del concreto que hay en F. Cuando un perno está dentro de un manguito tubular vacío, dicho perno de anclaje no absorbe resistencia efectiva hasta que se produce el deslizamiento y el espacio G,

que se indica en el croquis (b), se cierra. El apoyo contra la rosca de un perno de anclaje la dañará, pero generalmente este inconveniente es de poca importancia. El manguito tubular y los espacios D y E, croquis (a), pueden rellenarse con una lechada de cemento, con limaduras de hierro y azufre, con plomo, o con cualquier otro material que pueda amacizarse dentro y que en definitiva tenga suficiente resistencia a compresión.

FIGURA III-4



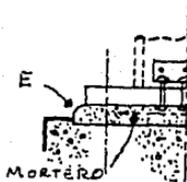
En casos especiales, se pueden emplear angulares pequeños, tal como el J que muestra el croquis (c), en los que se practican los orificios H dejando un huelgo de solamente 1.5 mm. Los pernos pueden apoyar contra el hierro en H, y esta angular apoyará contra una superficie de con-

creto. También es posible dejar permanentemente embebido este dispositivo metálico para apoyo de los pernos. Sin em bargo, hay que asegurarse de que el dispositivo metálico quede bien adaptado al concreto.

Por ejemplo, si en lugar del angular J se coloca un hierro en U con sus alas puestas hacia abajo, como el que se indica por K en el croquis (d), la parte inferior L puede no quedar rellena de concreto. También puede emplearse, para enlazar mecánicamente la estructura metálica y el concreto, una disposición basada en el detalle que muestra la figura III-5. En algunos casos, una barra diagonal dispuesta para arriostamiento junto a la base de la columna puede dar lugar a grandes fuerzas de corte laterales. Estas pueden absorberse soldando el fuste a la placa de asiento o uniendo éstas por medio de un par de angulares robustos y soldando al fondo de la placa de asiento unas barras entrecruzadas, como se indica en la figura III-5. Entonces, estas barras sirven a modo de orejetas que embebidas en la lechada de cemento proporcionan un enlace mecánico de tal forma que la masa no puede desplazarse lateralmente.

FIGURA III-5

PEDESTAL CON REBAJO



Cuando se utilizan manguitos tubulares en una cimentación, éstos dan lugar a planos de debilitamiento, especialmente si dos o más de ellos están próximos entre sí. Esto tiene particular importancia en el caso de máquinas vibrantes o cuando hay empujes o choques que dan lugar a que los pernos de anclaje apoyen en la parte interior de los manguitos. El concreto que rodea los pernos de anclaje deberá estar fuertemente armado. Es conveniente enlazar entre sí los tubos de cada fila y arriostrar los que están en lados opuestos de un pedestal por medio de varias hor-

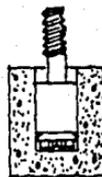
quillas enlazadas alrededor de los manguitos. Tras cimentaciones de grandes máquinas se agrietaron a lo largo de los manguitos debido a que dicha armadura era demasiado escasa. Las dos filas de estribos que iban dispuestas alrededor de la parte superior de un pedestal resultaron insuficientes; probablemente se habrían necesitado tres o cuatro filas con dos filas de horquillas intermedias junto a los tubos.

Los taquetes de expansión como los que se representan en la figura III-6, se utilizan cuando las máquinas o estructura metálica han de fijarse a un concreto ya fraguado y cuando no se conoce de antemano la posición que han de llevar los pernos de anclaje en la obra de concreto que se está realizando. Deberán tenerse en cuenta las siguientes observaciones:

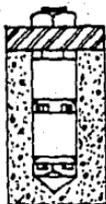
FIGURA III-6
TIPOS DE TAQUETES DE EXPANSION



a) TAQUETE DE EXPANSION
ANCLADO MEDIANTE
UNA TUERCA ROSCADA



b) CONJUNTO DE TAQUETE
DE EXPANSION FISO
CON UN MANGUITO
LISO



c) CONJUNTO DE TAQUETE
DE EXPANSION FISO CON
DOS MANGUITOS LISOS



d) TAQUETE DE EXPANSION
CON ANCLAJE DE FIBRA

1. Los taquetes de expansión pueden absorber una fracción moderada si el concreto resiste el tirón.
2. Generalmente son débiles para resistir el esfuerzo cortante transversal, ya que su parte superior no queda apoyada lateralmente, a menos que se disponga una lechada de mortero adecuada.
3. Normalmente, el orden de las operaciones es asentar la estructura metálica, situar los orificios, retirar dicha estructura metálica taladrar los agujeros, mon-

tar los taquetes y volver a asentar la estructura metálica. Deberá existir espacio suficiente para llevar a cabo dichas operaciones.

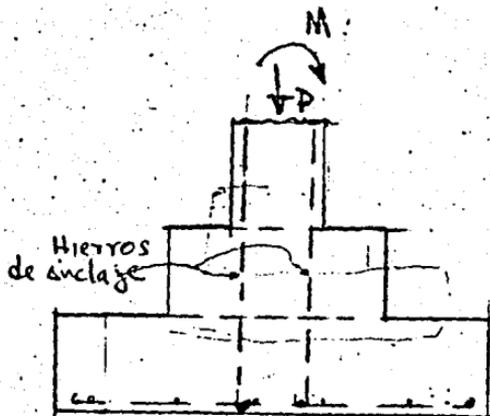
4. El importe de la mano de obra para los trabajos de instalación puede que exceda al de colocar los pernos de anclaje normales.
5. Alguno de los tipos de taquetes de expansión pueden ser desplazables lo que es una ventaja en el caso de maquinaria.
6. La perforación de los orificios y la acción de cuña de los taquetes de expansión pueden dar lugar a que los elementos de concreto de poco espesor se agrieten o se rompan, por ejemplo el anillo representado en la figura No. III-6. Esto mismo puede ocurrir cuando dichos taquetes se colocan junto al borde de secciones de concreto amplias.
7. Si al hacer la perforación, la broca tropieza con una barra de la armadura próxima a la superficie del concreto es necesario variar la posición del taquete. Por consiguiente, deberán disponerse las armaduras de manera que dejen espacio libre para colocar los taqueu

tes de expansión. En las proximidades de los bordes y en las esquinas deberán disponerse barras para que el concreto quede unido. Estas evitarán roturas importantes, pero es probable que no impidan que el concreto se agriete.

8. Generalmente, los taquetes de expansión son de tamaño pequeño y no deberán utilizarse cuando los esfuerzos de tracción sean grandes, salvo en raras ocasiones. Hay algunos casos en que es posible dejar alojamientos en forma de cuña en las bases grandes para maquinaria que se construyen de concreto, de esta forma puede asentarse el equipo, colocar los taquetes y rellenar dichos alojamientos con concreto con lo que los taquetes quedan fijos en su posición.

Es evidente que las columnas de concreto armado sometidas a movimientos de vuelvo, como los que se indican en la figura III-7, pueden y deberán anclarse dentro de sus cimientos mediante hierros pasantes o prolongando la armadura principal. Sin embargo, estas operaciones rara vez necesitan un trabajo refinado.

Figura III-7



2) Lechos de asiento.

En los lechos de asiento se emplea una lechada o mortero de cemento portland para disponerla bajo los apoyos.

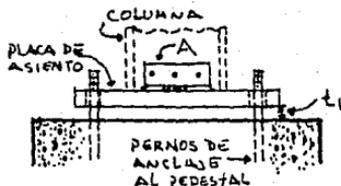
Fácilmente se comprende que un operario no dejará perfectamente acabado el paramento superior de una cimentación de concreto con el nivel exacto que se requiere ni con una superficie verdaderamente plana.

La retracción del concreto fluído que se extiende alrededor de los pernos de anclaje, la exudación del mismo, la vibración de las partes de concreto próximas, las mediciones para determinar la altura y el nivel correcto que se hacen de prisa, todas estas cosas son causa de que sea difícil y casi imposible conseguir que una obra de concreto quede acabada con precisión. En las partes de obra de poca importancia, la estructura metálica puede quedar bien asentada disponiéndola directamente sobre la superficie acabada del concreto por intermedio de una fina capa de cemento en polvo o de una lechada de cemento puro extendida con brocha. Es posible, pero no aconsejable dejar el nivel del concreto ligeramente más alto del necesario para después rebajarlo hasta la altura deseada picándolo o labrándolo con escoba. Sin embargo, es casi imposible dejar la obra perfectamente acabada entre los pernos de anclaje y su costo cae fuera de lo razonable.

Se muestra un caso sencillo de un lecho de asiento formado con mortero. Generalmente, una columna grande necesita una placa de asiento robusta, tal como se indica en (a). Una placa metálica de este tipo no puede colocarse a mano. Se hace uso de los angulares A para amarrar una cadena o gancho de manera que mediante una grúa pueda elevarse la placa y situarla en su posición sobre los pernos

de anclaje. Los pernos deberán estar colocados de manera que quede una separación prefijada t_1 para formar el lecho (es decir, rellenar con mortero este espacio de separación).

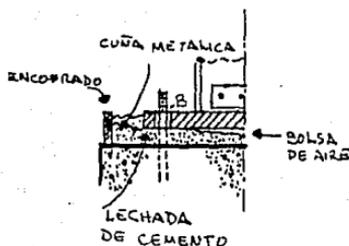
He aquí, de acuerdo con los croquis de las figuras, algunos procedimientos y posibilidades de realizar estos lechos de apoyo:



a) PLACA DE ASIENTO
Y PEDESTAL DE LA
COLUMNA

a) Se extiende sobre el paramento superior del pedestal una capa de mortero de cemento portland ($1:1\frac{1}{2}$ o $1:2$), después se asienta la placa y se la obliga hasta dejarla a la altura y el nivel correcto. Por supuesto, este procedimiento no es aconsejable por la dificultad de asegurar la suficiente precisión del montaje. También es evidente que el montaje de un soporte metálico de gran altura que vaya

unido a su placa de asiento presentará muchísimas dificultades, puesto que habrá que mantenerlo sujeto lateralmente durante uno o dos días y probablemente su gran peso comprimirá el mortero haciéndolo fluír sin que pueda predecirse el alcance de este inconveniente. En cualquier caso es necesario un control que ofrezca garantía. Es prácticamente posible asentar placas de 6 mm bien niveladas sobre el lecho de mortero y después que éste haya fraguado montar los pilares con sus bases soldadas.



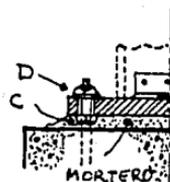
b) LECHADA DE CEMENTO CORRIENTE

b) En este caso, la placa de asiento va apoyada sobre cuñas metálicas que permiten situarla en su posición correcta. Se organiza un encofrado alrededor del asiento y se vierte mortero muy fluido para que penetre por debajo de la placa y vaya llenando el encofrado. Puede quedar una bolsa de aire hacia la parte central que impida a la placa estar perfectamente apoyada. Es posible levantar la placa, rellenar con mortero las partes que hayan quedado escasas y después volver a colocar la pieza metálica. Esta segunda operación cuesta dinero y puede que resulte difícil conseguir un contacto perfecto con las uñas. Si se procede ajustando primero la placa, retirándola después para verter el mortero y situar de nuevo la base, las dificultades son parecidas. Una vez que el mortero ha fraguado se procede a retirar las cuñas y rellenar los huecos. A veces, cuando la placa de base es grande, se practican dos amplios orificios en su parte central para verter el mortero a través de ellos y poder observar el nivel de la masa obligándola (si se puede) a que se apoye contra el acero.

Se fabrican productos especiales para su empleo en la formación de los lechos de asiento, tanto en forma de polvos para adiciones como en preparados para sustituir al mortero y lechada de cemento. La retracción por exceso de

agua y los asientos del mortero pueden crear dificultades; probablemente la retracción química será pequeña; puede que la calidad de la mano de obra tenga más importancia que las ligeras variaciones de los materiales.

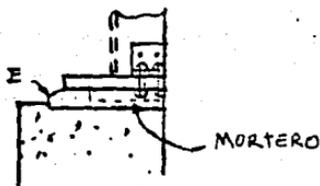
c) TUERCAS DE AJUSTE CUANDO SE
INTRODUCE MORTERO SECO



c) Pueden utilizarse dos tuercas C y D para conseguir la nivelación dejando una rosca de longitud suficiente en los pernos de anclaje. Se monta y sitúa con precisión la placa de asiento, después se vierte un mortero espeso seco por debajo de la base introduciéndolo mediante una barra y una maza de hierro hasta retacar el hueco y dejar la placa bien asentada. Se necesita disponer de espacio suficiente alrededor de la base para poder realizar dichas operaciones. Casi es esencial que cada placa de asiento lleve cuatro pernos de anclaje, ya que si solamente lleva dos, la placa de base puede girar alrededor de la recta que determina cuándo el mortero relleno más un lado que otro. Es evidente que la estructura ejercerá una cierta presión sobre la tuerca C, pero esto no tiene importancia, siempre que el relleno esté bien hecho. Un obrero cuidadoso puede conseguir de esta manera realizar un apoyo de toda garantía. Las operaciones para nivelar por el procedimiento de las tuercas pueden realizarse también por el siguiente orden, quitar la base, depositar el mortero all nándolo, volver a colocar la placa metálica y apretar las tuercas D hasta obligarla a descender a su posición correc ta, lo que conseguirá siempre que no quede mortero apri^o o nado ente la placa y las tuercas C.

d) Cuando las cargas son muy grandes y especialmente cuando las bases corresponden a maquinaria sometida a choques, conviene disponer medios para evitar que el mortero se deslice del apoyo en el caso de que se agriete. El pedestal de este croquis lleva un rebajo en E; la base puede rellenarse en seco; pero la solera de mortero no puede quedar suelta. Pueden conseguirse resultados parecidos dejando el paramento superior del pedestal con un acabado picado o rugoso. Colocando una malla de alambre entre el mortero puede evitarse que éste se disgregue en pedazos, pero probablemente no se evitarán las grietas en primer grado.

Es corriente dejar una separación de 2,5 a 5 cm. para disponer el lecho de mortero; cuando ésta es menor resulta difícil introducir la masa. En el caso de grandes máquinas conviene dejar un espacio para el lecho de mortero que permita extender una capa de 7.5 a 12 cm. de espesor.



d) PEDESTAL CON REBAJO

III.4 AISLAMIENTOS Y AMORTIGUADORES

Cuando no es posible reducir las vibraciones en su origen o, a pesar de la reducción, siguen siendo objetables, el procedimiento a considerar consiste en impedir que las vibraciones lleguen a la estructura. Esto se puede lograr por alguno de los métodos siguientes.

- 1) ALEJAMIENTO DE LA FUENTE DE VIBRACION.
- 2) CREACION DE DISCONTINUIDADES EN LA TRAYECTORIA DE LAS ONDAS VIBRATORIAS.
- 3) AMORTIGUAMIENTO DE LA VIBRACION TRANSMITIDA.
- 4) ABSORCION MECANICA DE LA MISMA VIBRACION

1) ALEJAMIENTO DE LA FUENTE DE VIBRACION

Esta es la solución más obvia, y en ocasiones la más económica, aunque no se la utilice con la frecuencia conveniente. Se debe a que rara vez se prevé la posibilidad de que las vibraciones inducidas por determinadas máquinas afecten instalaciones que se vayan a construir en su vecindad, o inversamente, que la colocación de una máquina en determinado lugar pueda dar origen a vibraciones que afecten estructuras o instalaciones existentes. Generalmente se advierte la existencia de vibraciones objetables una vez que la obra ha sido concluída; entonces se recurre a medidas correctivas. Con objeto de tener algunos lineamientos de carácter preventivo y poder estimar en forma aproximada el efecto de las vibraciones que una máquina desplantada en el suelo pueda causar en estructuras vecinas, se presenta la información que sigue.

A. Máquinas de impacto (martillos, piloteadoras, prensas, troqueles, etc.)

Peso de la cabeza que golpea	Distancia a la que afecta la - vibración
< 2 ton	25 m
2 a 10 ton	60 m

B. Máquinas de régimen estacionario.

De alta velocidad. $N > 500$ RPM (motores eléctricos, bombas centrífugas, turbinas).

Causan vibraciones que pueden ser objetables en elementos estructurales adyacentes como vigas, columnas, losas, etc.

De velocidad media. $50 < N < 500$ RPM.

(Máquinas reciprocantes, compresoras).

Vibraciones objetables a estructuras en un radio de 300 m.

De baja velocidad. N<50 RPM.

(Molinos de vapor, prensas rotatorias).

No son objetables a edificios vecinos.

2) CREACION DE DISCONTINUIDADES EN LA TRAYECTORIA DE LAS ONDAS VIBRATORIAS

En relación con la protección contra las vibraciones propagadas a través del suelo, se indica la conveniencia de crear discontinuidades en el medio para impedir que pasen las ondas vibratorias o para alargar el camino que deben recorrer (esto último reduce su intensidad debido a la disipación de energía en el suelo), utilizando trincheras y pantallas.

En el caso de maquinaria colocada en la estructura, siempre es posible establecer juntas de construcción, rellenas de un material absorbente como corcho, fieltro o hulespuma, que restrinjan la propagación de las ondas.

La maquinaria situada en la planta baja de un edificio deberá tener una cimentación separada de la cimentación del mismo edificio. Además, en el caso de estructuras metálicas, conviene colocar una capa de material absorbente de vibraciones (por ejemplo, neopreno) entre la base de las columnas y la cimentación, de manera que la vibración que pasa por el suelo a la cimentación no se transmita a las columnas a través del anclaje de las mismas.

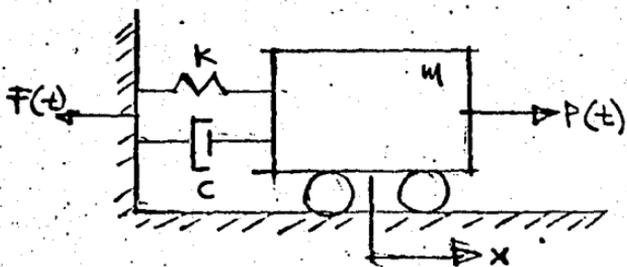


FIGURA III-8

3) AMORTIGUAMIENTO DE LA VIBRACION TRANSMITIDA

Los conceptos sobre el amortiguamiento de la vibración que una máquina induce en el suelo o en la estructura sobre la que se apoya, se basan en estudios de transmisibilidad. En su forma más sencilla, considerando un sistema de un grado de libertad con amortiguamiento lineal como el mostrado en la fig. III-8, la transmisibilidad se define como el cociente F_o/P_o , en que el subíndice o denota el valor máximo que puede tomar la función del tiempo a la que afecta. En el caso en que $P(t)$ sea una función armónica del tipo.

$$P(t) = P_o \text{ sen } \omega t$$

$$\begin{aligned} P(t) &= \text{FUERZA APLICADA} \\ P_o &= \text{FUERZA APLICADA MAXIMA} \\ \omega &= \text{FRECUENCIA NATURAL} \\ t &= \text{TIEMPO} \end{aligned}$$

Y la fuerza transmitida en condiciones estacionarias será la suma de las fuerzas del resorte y del amortiguador.

$$F(t) = KX + C\dot{X}$$

(t) = fuerza transmitida a los cimientos debido a la vibración de la máquina.

c = constante del amortiguador lineal.

k = constante de elemento flexible.

x = desplazamiento del móvil de masa m.

x = velocidad del mismo.

En estas condiciones, la transmisibilidad, cuando el amortiguamiento es bajo, está dada por

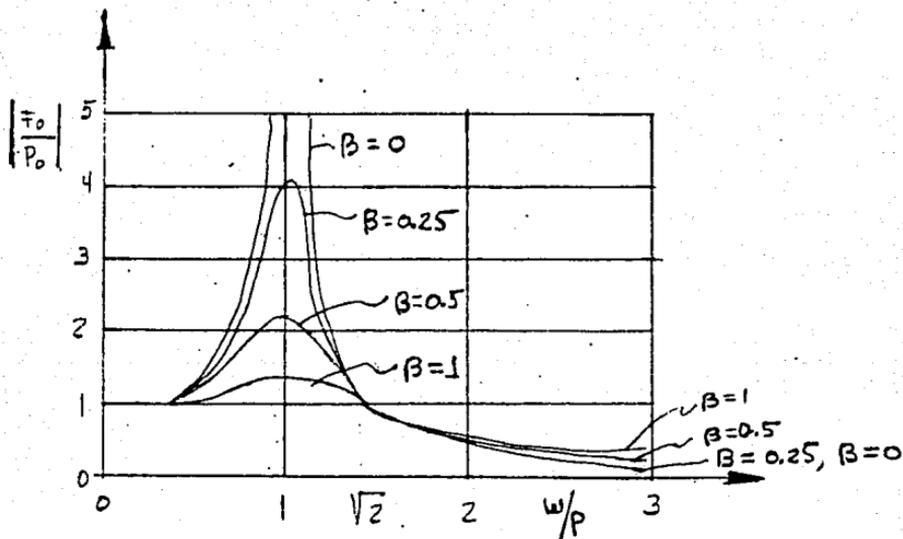
$$\left| \frac{F_o}{P_o} \right| = \frac{\sqrt{1 + 4\beta^2 \left(\frac{\omega}{p}\right)^2}}{\sqrt{\left[1 - \left(\frac{\omega}{p}\right)^2\right]^2 + 4\beta^2 \left(\frac{\omega}{p}\right)^2}} \quad \text{E.C. III-1}$$

$\left| \frac{F_o}{P_o} \right|$ = transmisibilidad.

ω = frecuencia circular de la fuerza pulsante

$p = \sqrt{\frac{k}{m}}$ = frecuencia circular del sistema.

$\beta = \frac{c}{2mp}$ = porcentaje del amortiguamiento crítico.



*

FIGURA III-9

La ecuación III-1 y la fig. III-9 resultan aplicables para elementos flexibles y amortiguadores lineales. Sin embargo, en la práctica, la mayoría de los materiales que se utilizan para amortiguar vibraciones actúan en un nivel de esfuerzos que excede el de su comportamiento lineal. Por otra parte, el elemento flexible mostrado en la fig. III-8 tampoco resulta lineal en las condiciones en que se

utiliza en la práctica. En estas circunstancias, el estudio de la transmisibilidad se complica bastante, ya que la absorción de energía y el comportamiento dinámico del sistema dependen del material empleado, de la frecuencia de vibración, y del nivel de esfuerzos al que estará sujeto.

***Referencia:**

COMISION FEDERAL DE ELECTRICIDAD "VIBRACIONES MECANICAS"

4). ABSORCION MECANICA DE LA MISMA VIBRACION

Un procedimiento para reducir la respuesta dinámica de una estructura sujeta a vibraciones inducidas en la misma por maquinaria en operación, consiste en colocar en la estructura una masa adicional, ligada a ella a través de un elemento flexible de características tales que la energía con que la máquina está alimentando a la estructura, sea absorbida en su mayor parte por la vibración de esa masa adicional.

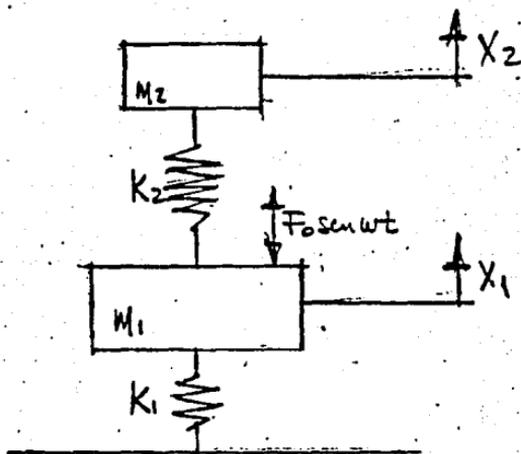


FIGURA III-10 ABSORCION MECANICA DE ENERGIA

En la fig. III-10 se presenta un diagrama simplificado del sistema. La perturbación que actúa sobre la estructura es la fuerza armónica $F \cdot \sin \omega t$. La estructura está representada por el sistema constituido por la masa m y el elemento flexible de rigidez k_p . El mecanismo disipador de energía está constituido por la masa m_2 y el elemento flexible de rigidez k_2 . El movimiento de la masa m_1 es $x_1 = X_1 \sin \omega t$, y el de la masa m_2 es $x_2 = X_2 \sin \omega t$.

Llamando

$P_1 = \sqrt{k_1/m_1}$ = frecuencia natural circular de la masa m_1 .

$P_2 = \sqrt{k_2/m_2}$ = frecuencia natural circular de la masa m_2 .

$(X_{est})_1 = F_0/X_1$ = deflexión estática de m_1 , debida a una fuerza constante F_0 . Las amplitudes de vibración resultante para ambas masas estarán dadas por las ecuaciones.

$$\frac{X_1}{(X_{est})_0} = \frac{1 - \left(\frac{\omega}{P_2}\right)^2}{\left[1 + \frac{k_2}{k_1} - \left(\frac{\omega}{P_1}\right)^2\right] \left[1 - \left(\frac{\omega}{P_2}\right)^2 - \frac{k_2}{k_1}\right]} \quad \text{EC. III-2}$$

$$\frac{X_2}{(X_{est})_0} = \frac{1}{\left[1 + \frac{k_2}{k_1} - \left(\frac{\omega}{P_1}\right)^2\right] \left[1 - \left(\frac{\omega}{P_2}\right)^2 - \frac{k_2}{k_1}\right]} \quad \text{EC. III-3}$$

De las ecuaciones III-2 y III-3 resulta evidente que la amplitud de vibración de la estructura, X_1 , se vuelve cero cuando la frecuencia natural de la masa adicional, P_2 , coincide con la frecuencia de la excitación, w . Por otra parte, con esta frecuencia, la amplitud de vibración de la masa m_2 resulta

$$X_2 = - \frac{F_0}{K_2}$$

Donde el signo negativo indica que X_2 está defasado 180° respecto a la fuerza excitadora.

Aunque la amplitud de vibración de la estructura se reduce a cero cuando $w=p_2$, existen dos frecuencias resonantes para las que dicha amplitud se vuelve infinita. Estas frecuencias de excitación se obtienen de la solución de la ecuación cuadrática siguiente:

$$\left(\frac{P_2}{P_1}\right)^2 \left(\frac{w}{P_2}\right)^4 - \left[1 + \left(1 + \frac{m_2}{m_1}\right) \left(\frac{P_2}{P_1}\right)^2\right] \left(\frac{w}{P_2}\right)^2 + 1 = 0$$

Se observa que dichas frecuencias resonantes son funciones de la relación de masas, m_2/m_1 , y de la relación de frecuencias naturales, p_2/p_1 , del sistema disipador de energía y del sistema original. La fig. III-11 presenta la respuesta del sistema para el caso particular en que $p_1=p_2$ y $m_2/m_1 = 0.2$. En la fig. III-12 se presentan las frecuencias resonantes de la excitación en función de la relación de masas, para el caso particular en que $P_1=p_2$.

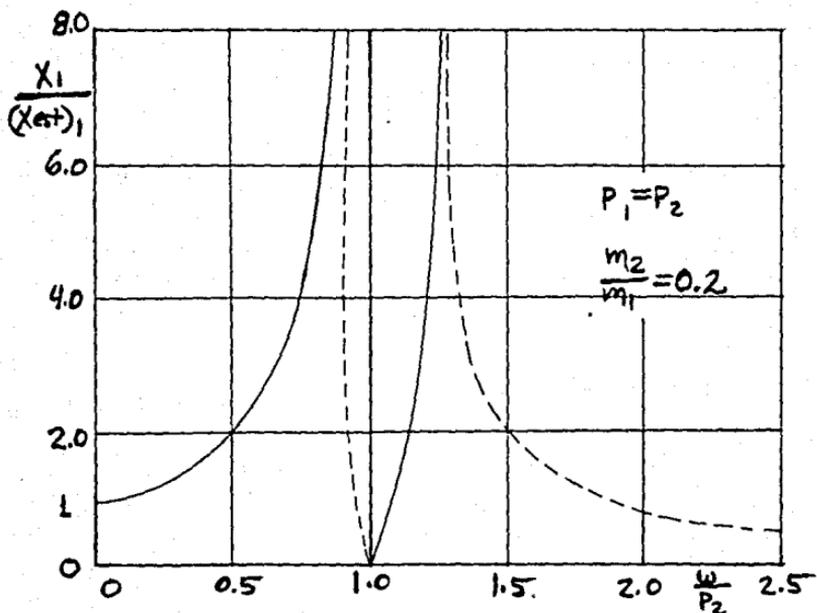
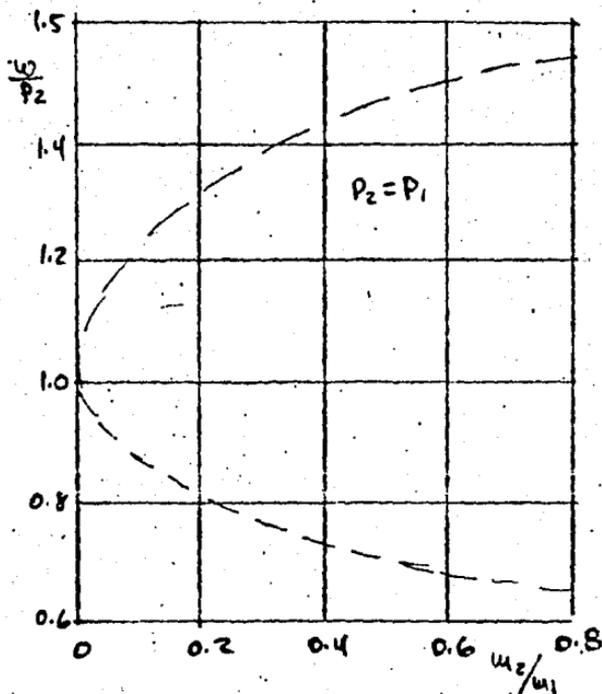


FIG. III-11 RESPUESTA DEL SISTEMA CON ABSORCIÓN MECÁNICA DE ENERGÍA

FIG. III-12 - FRECUENCIA DE RESONANCIA EN FUNCION
DE LA RELACION DE MASAS



REFERENCIA:

COMISION FEDERAL DE ELECTRICIDAD "VIBRACIONES MECANICAS"

IV CRITERIOS DE DISEÑO

IV. I-POSIBLES SOLUCIONES

Entre las soluciones más usuales tenemos los métodos:

- a) ESTÁTICO
 - b) DINÁMICO
-
- a) MÉTODO ESTÁTICO

En nuestro medio no ha dejado de utilizarse lo que podríamos llamar método estático de diseño de cimentaciones para maquinaria. Consistente en incrementar el peso propio de la máquina con un factor de impacto para diseñar la cimentación sujeta únicamente a la carga estática incrementada. Sin embargo, aunque de esta manera se logra un diseño que cumpla las condiciones de capacidad de asentamientos permisibles, no es difícil imaginar la posibilidad de que la frecuencia de vibración correspondiente a la velocidad de operación de la máquina o alguna de sus componentes armónicas coincida con la frecuencia fundamental de vibración del sistema suelo-cimentación produciéndose un fenómeno de resonancia en que las amplitudes de vibración resultante pueden ser intolerables.

También se puede visualizar el caso de que la vibración inducida por la máquina produzca modificaciones inadmisibles en el suelo sobre el que descansa la cimentación, tales como densificación de arenas sueltas o remoldeo de arcillas sensitivas.

Estas razones, entre otras, resaltan la necesidad de recurrir a un método de diseño de cimentaciones de maquinaria que tome en cuenta la naturaleza eminentemente dinámica del fenómeno. El método estático podría utilizarse entonces como un primer tanteo.

b) METODO DINAMICO

Los criterios dinámicos que se utilizan en la actualidad para el diseño de cimentaciones de maquinaria pueden clasificarse en dos grandes grupos, dependiendo de que consideren al suelo como una cama de resortes linealmente elásticos y sin masa o como un medio elástico, homogéneo isótropo y seminfinito. En realidad, ninguna de las dos idealizaciones del suelo es rigurosamente correcta. Al considerar al suelo como una cama de resortes, se estarán despreciando fenómenos muy importantes, entre ellos la dispersión de energía en el terreno y la propagación de ondas en su superficie, pero se tiene la ventaja de que una vez determinados los parámetros del suelo idealizado, el aná-

lisis dinámico del sistema máquina-cimentación-suelo resulta muy sencillo. Por otra parte, la idealización del suelo como un semiespacio elástico permite considerar los fenómenos mencionados anteriormente pero complica el análisis dinámico. Además, se sabe que el suelo no es perfectamente elástico y que, debido a la estratificación, en muchas ocasiones no puede considerarse como medio seminfinito.

IV.2- MAQUINAS

TIPOS DE MAQUINAS

No es posible hacer una clasificación universal de los tipos de máquinas que pueden inducir vibraciones en estructuras; sin embargo, la clasificación indicada en las recomendaciones permite dar lineamientos relacionados con las características de la vibración que se puede esperar que será inducida por dichas máquinas. Así, los martillos mecánicos inducen generalmente vibraciones transitorias; las máquinas reciprocantes, vibraciones estacionarias normalmente de baja frecuencia, y las máquinas rotatorias, vibraciones estacionarias de alta frecuencia.

Las otras máquinas que no encajan en ninguno de los tres tipos anteriores pueden ser vehículos que se mueven en las estructuras. Por ejemplo, grúas viajeras. Puede tratarse también de máquinas especiales como molinos, prensas, trituradoras y rodillos de laminación.

Por lo anteriormente expuesto y sin pretender una clasificación exhaustiva, se puede establecer una distinción entre los siguientes tipos de máquinas:

- 1) Martillos mecánicos
- 2) Máquinas reciprocantes
- 3) Máquinas rotatorias
- 4) Otras máquinas

- 1) Martillos mecánicos.

Pueden distinguirse los dos tipos principales siguientes:

- a) Martillos impulsados por motor y transmisión.
 - b) Martillos de vapor o de aire.
-
- A) Martillos impulsados por motor y transmisión.

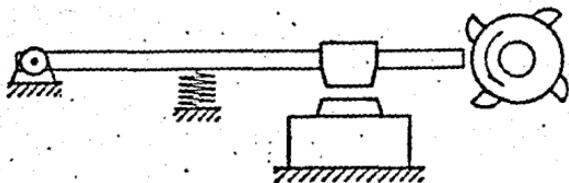
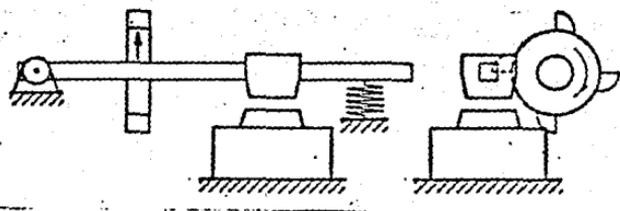
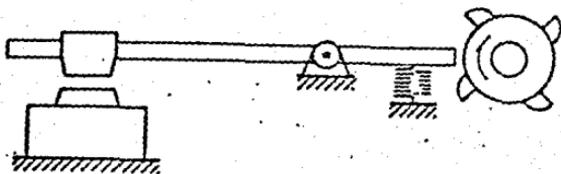
El mecanismo impulsor de estos martillos está construido de tal manera que el motor y la transmisión no sean afectados por el impacto.

Para lograr esto, el martillo y la transmisión pueden desacoplarse antes del choque: también existe un dispositivo que permite un acoplamiento elástico durante el choque.

Los principales tipos de martillos impulsados por motor y transmisión son:

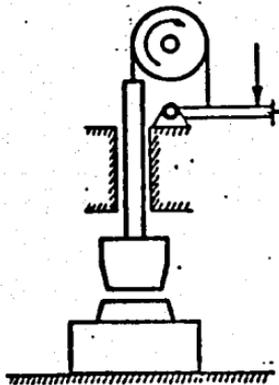
Martillos de leva
Martillos de fricción
Martillos de banda
Martillos de resorte
Martillos de tipo "Ajax"
Martillos de colchón de aire.

Martillos de leva. Existen tres clases, según el género de palanca sobre la que actúa la leva. Se muestran en forma esquemática en las figuras.

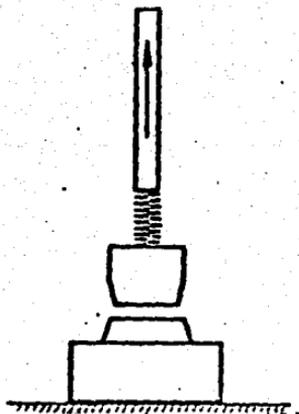


Martillos de fricción. Son del tipo mostrado esquemáticamente en la figura.

El levantamiento del martillo antes de la caída se debe a la fricción entre una excéntrica y el cuerpo del martillo propiamente dicho.



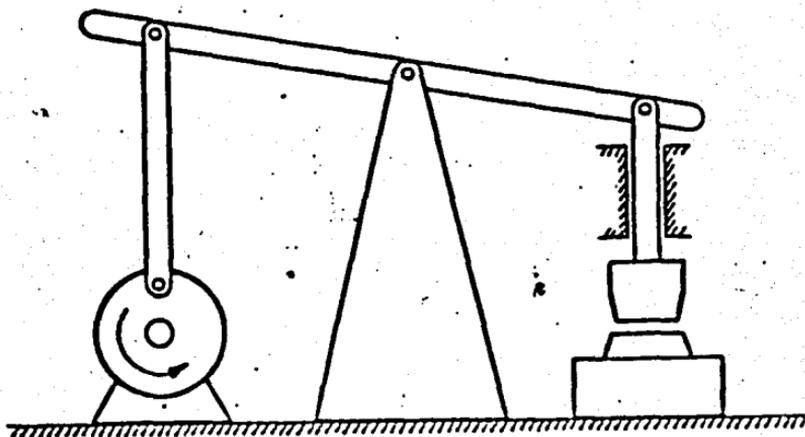
Martillos de banda. En estos casos la fricción es aplicada no a través de una excéntrica como en los martillos llamados de fricción, sino a través de una banda, como se indica esquemáticamente en la figura.



Martillos de resorte. Se muestran esquemáticamente en la figura.

El resorte establece el acoplamiento elástico entre la transmisión y el martillo propiamente dicho.

Martillos tipo "Ajax". En estos martillos una excéntrica produce el movimiento. Se muestran esquemáticamente en la figura.



Martillos de colchón de aire. En estos martillos, mostrados esquemáticamente en la figura IV-5, existen un cilindro y un émbolo insertados entre la barra impulsora del motor y la cabeza del cilindro que empuja al martillo.

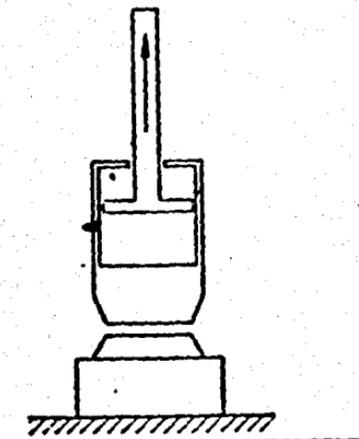


FIGURA II-5

B) Martillos de vapor o de aire.

En estos martillos, el pistón y la cabeza que golpea están unidos por medio de una barra impulsora común.

Se pueden distinguir dos tipos:

Martillos de forja

Martillos de yunque móvil.

Martillos de forja. Los hay de dos clases: de acción sencilla y de acción doble. Son semejantes a los martillos utilizados en las máquinas piloteadoras.

Martillos de yunque móvil. Se muestran esquemáticamente en la figura IV-6. En estos martillos, llamados también martillos de dos cabezas, se anula la acción y la reacción al golpear, por lo que no hay efectos dinámicos considerables en la cimentación.

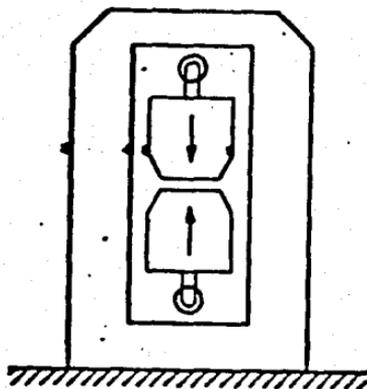


FIGURA IV-6

2. Máquinas reciprocantes

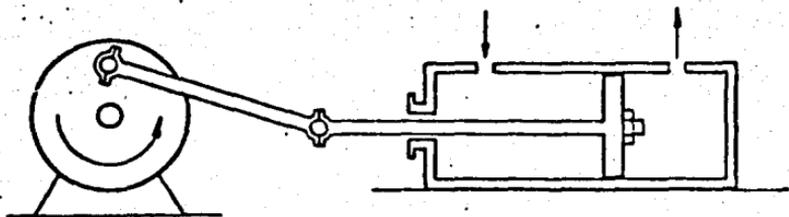
Son aquéllas en las que el movimiento, debido generalmente a la expansión violenta de un gas, se logra mediante la combinación de émbolos, bielas y manivelas. El movimiento alternante, generalmente armónico simple, del émbolo, se transforma por la acción de la biela en un movimiento circular de la manivela. Generalmente son máquinas de baja velocidad.

Se pueden distinguir los tipos siguientes:

- a) Máquinas de vapor
- b) Motores diesel y de gasolina
- c) Compresoras de émbolo
- d) Bombas de émbolo

a) Máquinas de vapor. Generalmente constan de uno o dos cilindros, y pueden ser horizontales o verticales. El vapor generado en una caldera impulsa el émbolo de cada cilindro.

Horizontales. Un diagrama esquemático se presenta en la figura.



Verticales. En la figura IV-11 se muestra su diagrama esquemático

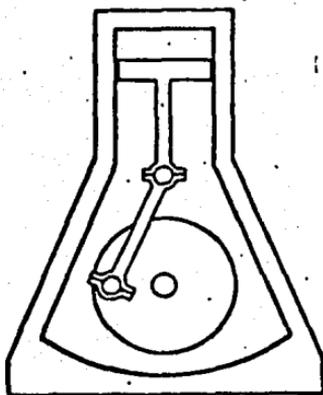
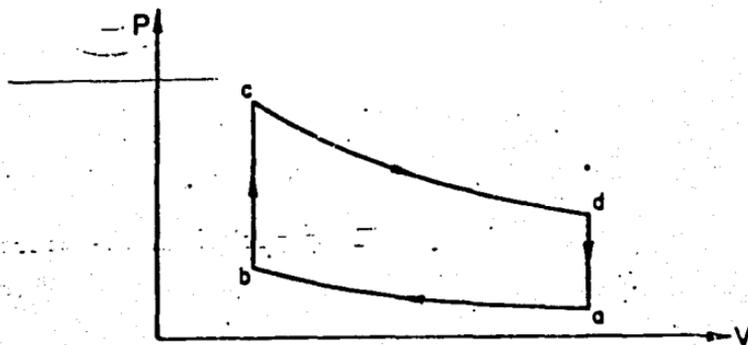


FIGURA IV-11

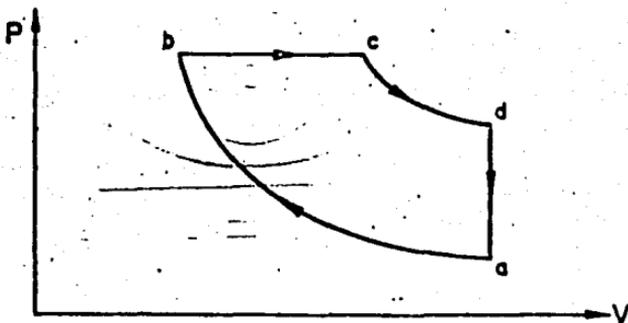
b) Motores diesel y de gasolina.

Constan generalmente de más de tres cilindros. Pueden ser de dos o de cuatro tiempos. El ciclo básico presión-volumen de los motores a base de diesel (diesel) se denomina ciclo Diesel. El de los motores de gasolina, ciclo Otto. El impulso se debe a la formación de gases producto de la explosión de una mezcla de combustible y aire.

Los ciclos presión-volumen representativos de motores de este tipo se muestran en las figuras.



- | | | |
|-----|-----------------------------------|--------------|
| a b | Compresión isoentrópica | (compresión) |
| b c | Calentamiento a volumen constante | (explosión) |
| c d | Expansión isoentrópica | (expansión) |
| d a | Enfriamiento a volumen constante | (escape) |



- | | |
|------|-----------------------------------|
| a' b | Compresión isoentrópica |
| b c | Calentamiento a presión constante |
| c d | Expansión isoentrópica |
| d a | Enfriamiento a volumen constante. |

d) Bombas de émbolo. Semuestran esquemáticamente en la figura IV-15. Pueden ser horizontales o verticales, dependiendo de la posición de los cilindros; o bien de acción doble o sencilla.

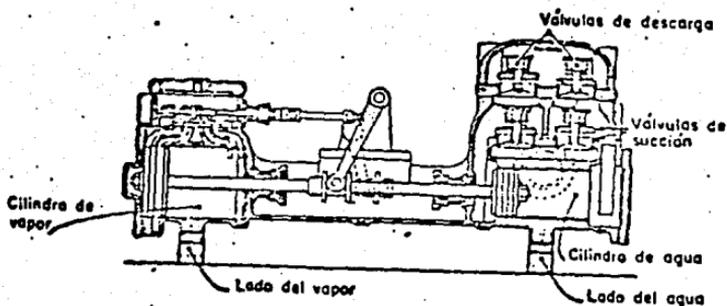


FIGURA IV-15

3. Máquinas rotatorias

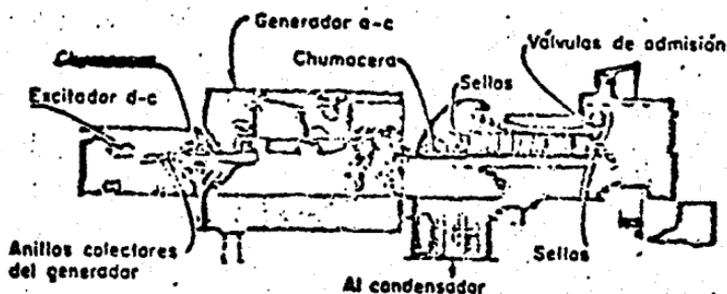
En estas máquinas, el desplazamiento de casi todas las partes móviles describe una trayectoria circular. El movimiento generalmente obedece a la ley de acción y reacción al desplazarse un fluido entre los álabes de una o

más ruedas. En otros casos el movimiento se debe a la existencia de un conductor dentro de un campo magnético variable. Generalmente son máquinas de alta velocidad. Fundamentalmente las máquinas de este tipo son turbinas o motores eléctricos. Se pueden distinguir los tipos siguientes:

- a) Turbogeneradores
- b) Bombas y compresoras rotatorias
- c) Motores eléctricos

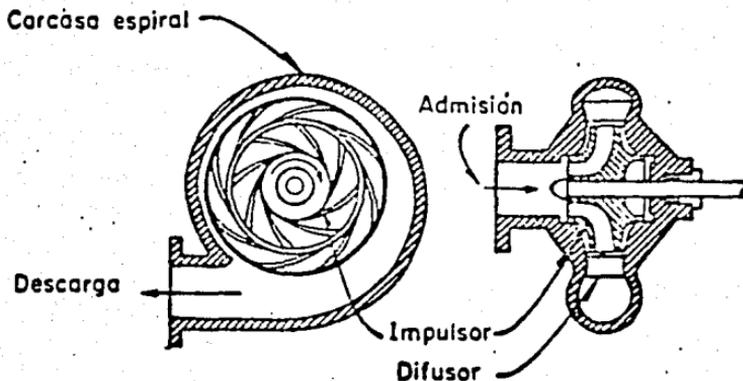
a) Turbogeneradores. El agua o el vapor, al desplazarse entre los álabes, impulsan la turbina, la cual está acoplada con el campo móvil (rotor) de un generador eléctrico.

El diagrama de un turbogenerador se presenta en la figura.

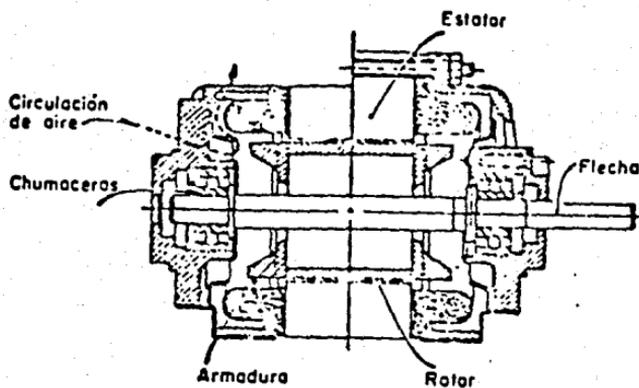


b) Bomba y compresoras rotatorias. En máquinas de este tipo, las partes móviles, generalmente accionadas por un motor externo, obligan al fluido (agua, aceite, aire, etc.) a circular entre los álabes y a desplazarse en determinada dirección.

En algunas circunstancias estas máquinas pueden operar indistintamente como turbinas o como bombas, invirtiéndose el sentido de flujo del fluido.



c) Motores eléctricos. Un campo magnético variable hace que los conductores del rotor se desplacen, produciéndose un movimiento circular.



4. Otras máquinas

Sería imposible pretender una clasificación de los otros tipos de máquinas y establecer lineamientos generales para resistir las vibraciones inducidas por ellas, por lo que cada caso debe estudiarse en particular.

Se pueden mencionar las siguientes, sin pretender clasificarlas:

Rodillos de laminación
Prensas de forja
Trituradoras de caída libre
Molinos de quijadas
Molinos de cono
Máquinas herramientas
Grúas viajeras.

IV.3 DISEÑO DE CIMENTACION PARA DIFERENTES MAQUINAS

Procedimientos de diseño de cimentaciones masivas para máquinas reciprocantes y rotorias

Habiendo estudiado el análisis de un bloque, y teniendo a la mano un reglamento para el diseño y construcción de una cimentación, se sigue este orden:

1) Datos de diseño.

Asegurar que la información del fabricante sea la correcta y esté completa.

2) Selección de las constantes del suelo.

Para un diseño preliminar, las constantes del suelo pueden ser adoptadas de los valores tabulados en reglamentos. Para todo trabajo importante, es recomendado que las propiedades dinámicas del suelo sean determinados en el laboratorio y en el campo en al menos tres niveles diferentes de esfuerzos. Un valor particular puede ser elegido para un anticipado nivel de esfuerzo en un problema dado de diseño. Una corrección para una presión de confinamiento debe ser aplicada antes de proceder con el diseño.

A menudo se puede ser deseable escoger un rango de las constantes del suelo y trabajar fuera de los valores límites de las frecuencias naturales y las amplitudes de movimiento para el rango de la constante del suelo seleccionado.

3) Diseño del diagrama de la cimentación.

Del criterio dimensional listado en las especificaciones se seleccionan dimensiones de prueba para la cimentación. Para simplificar los cálculos es conveniente seleccionar una forma simple en planta. Cualquier ranura, proyección y asimetría debe evitarse en lo posible.

4) Centrado del área de cimentación en contacto con el suelo y determinar las presiones del suelo.

Determinar el centro de gravedad combinado de la máquina y la cimentación en los planos X, Y y Z; y revisar para ver que la excentricidad a lo largo de los ejes X o Y no exceda del 5%. Este es el límite máximo para este tipo de análisis. Si la excentricidad excede del 5%, el cabeceo adicional debido a la excentricidad cargada debe ser considerada en los análisis. La presión estática debe ser revisada; ésta debe ser menor de 80% de la presión permisible del suelo bajo condiciones estáticas. Esta condición

es encontrada en la mayoría de las cimentaciones prácticas.

5) Valores de diseño para cargas excitantes y posibles formas de vibraciones de la cimentación.

Los valores finales de fuerzas y momentos resultantes pueden ser ahora determinados con respecto al centro de gravedad combinado del sistema. Si la fuerza vertical desbalanceada actúa en alguna excentricidad, daría lugar a un momento. Similarmente la fuerza desbalanceada horizontal actúa a una cierta distancia sobre la superficie de una cimentación masiva. La magnitud del momento debido a la fuerza horizontal iguala al producto de la fuerza horizontal y la suma de la distancia entre el nivel de soporte de la máquina y la parte superior del bloque, más la distancia entre la parte superior del bloque y el centro de gravedad del sistema combinado.

Las magnitudes relativas de las fuerzas desbalanceadas y momentos deben ayudar a determinar la naturaleza de las vibraciones en la cimentación masiva.

6) Determinar los momentos de inercia y momentos de inercia de masa.

Los siguientes momentos de inercia y momentos de inercia

cia de masa.

Los siguientes momentos de inercia y momentos de inercia de masa necesitan ser determinados:

I = momento de inercia del área de base con respecto al eje que pasa a través del centroide del área de base de contacto y perpendicular al plano de vibraciones.

$$I = \frac{b a^3}{12}$$

donde "a" es la dimensión del área rectangular en el plano de vibración es perpendicular a este plano.

M_{m_0} = momento de inercia de masa del sistema completo con respecto al eje superior.

M_m = momento de inercia de masa del sistema con respecto al de un eje pasando a través del centro combinado de gravedad y perpendicular al plano de vibraciones.

$$M_m = M_{m_0} - M L^2$$

en donde "L" = altura del centro de gravedad combinado sobre la base; entonces:

$$\gamma = \frac{M m}{M m_0}$$

Si un momento en el plano de la parte superior del bloque está también actuando, entonces el siguiente momento de inercia también está determinado:

J_z = momento polar del área de la base de cimentación con respecto al eje vertical de rotación pasando a través del centro de gravedad del área de contacto.

M_{mz} = momento de inercia de masa del bloque y cimentación con respecto del eje de rotación.

7) Cálculo de frecuencias naturales y amplitudes de movimiento.

Modos desacoplados: oscilaciones verticales y vibraciones torsionales pueden ocurrir independientemente de cualquier otra vibración. Así las frecuencias naturales y amplitudes correspondientes pueden ser determinadas con la ayuda de las siguientes ecuaciones:

$$\text{FRECUENCIA NATURAL DEL SISTEMA} = \omega_{nz} = \sqrt{\frac{C_A A}{m}}$$

$$\text{AMPLITUD DEL MOVIMIENTO} = A_z = \frac{P_0}{m(\omega_{nz}^2 - \omega^2)}$$

$$\text{FRECUENCIA NATURAL DE TORSION} = \omega_{n\psi} = \sqrt{\frac{C_\phi J_z}{M m_z}}$$

$$\text{AMPLITUD MAX. DEL ANGULO DE TORSION} = \psi_{max} = \frac{M z}{M m_z (\omega_{n\psi}^2 - \omega^2)}$$

Modos acoplados: deslizamientos y oscilaciones son modos acoplados de vibraciones. Las siguientes frecuencias naturales son determinadas:

$$\text{FRECUENCIA NATURAL DE TRASLACION HORIZONTAL} = \omega_{nx} = \sqrt{\frac{C_r A}{m}}$$

$$\text{FRECUENCIA NATURAL DE CABECEO} = \omega_{n\phi} = \sqrt{\frac{C_\phi I}{M m_0}}$$

$$\omega_{n_{1,2}}^2 = \frac{1}{2\gamma} \left[(\omega_{n\phi}^2 - \omega_{nx}^2) \pm \sqrt{(\omega_{n\phi}^2 + \omega_{nx}^2)^2 - 4\gamma(\omega_{n\phi}^2 - \omega_{nx}^2)} \right]$$

- C_x =coeficiente elástico de compresión uniforme.
- C_ϕ =coeficiente elástico de compresión no uniforme.
- C_r =coeficiente elástico de corte uniforme.
- C_ψ =coeficiente elástico de corte no uniforme.
- A =amplitud del movimiento vertical de la base.
- M =masa del conjunto.
- P_0 =fuerza aplicada.
- W =frecuencia natural de la máquina.
- M_{mz} =momento de inercia de masa del conjunto con el eje Z.
- M_z =momento de rotación con el eje Z.
- M_{m0} =momento de inercia de masa del conjunto con el eje superior.

Ahora amplitudes de vibraciones forzadas pueden ser calculadas con la ayuda de las siguientes ecuaciones:

$$A_x = \frac{(C_r A L^2 + C_\phi I - M_{cg} \omega^2) P_x + (C_r A L) M_y}{\Delta(\omega^2)}$$

$$A_\phi = \frac{(C_r A L) P_x + (C_r A - m \omega^2) M_y}{\Delta(\omega^2)}$$

en la que "Ax" = amplitud lineal horizontal de un centro de gravedad combinado y "Aφ" = amplitud rotacional en radianes con respecto del centro de gravedad combinado.

Ahora la amplitud del bloque debe ser determinada en el nivel de colocación de la cimentación. Es esta amplitud la que necesita ser comparada con la amplitud permisible de movimiento.

En caso de tener valores de frecuencias o vibraciones que puedan originar problemas (resonancia, etc.), es re-

comendable modificar la masa de la cimentación para con esto variar las frecuencias y vibraciones, hasta obtener valores óptimos.

Referencia: PRAKASH "SOIL DYNAMICS"

IV.4.- CIMENTACION DE UN MARTILLO

Se propone instalar un martillo de forja de 1.55 ton. Para la manufactura de muelles de hojas. El suelo de la zona es de arcilla dedimentada de mediana plasticidad mezclada con arena fina sedimentada de densidad relativa media.

El nivel freático está a una profundidad de 5.65 metros bajo el nivel del suelo. El coeficiente de compresión elástico uniforme del suelo $\beta_u = 1.1325 \times 10^{-3} \text{ ton/m}^3$ para una área de 10 M2 determinado con pruebas en el lugar.

El martillo tiene las siguientes especificaciones:

Peso total del martillo	$W_0 = 1550 \text{ Kg}$
Altura máxima de caída	$h = 900 \text{ mm.}$
Presión del vapor	$P = 70 \text{ ton/m}^2$
Peso del yunque y máquina	22.5 ton
Peso total del martillo	34.5 ton
Area de apoyo del yunque	$A_2 = 2.1 \times 1.3 = 2.73 \text{ M}^2$
Area del pistón	$A_c = 0.129 \text{ M}^2$

Datos propuestos para efecto de diseño

Material del amortiguador bajo el yunque: corazón de madera de módulo de elasticidad = $5 \times 10^4 \text{ ton/m}^2$

Espesor del amortiguador bajo el yunque = $t = 0.61 \text{ m}$

Dimensiones del bloque de cimentación = $6.5 \text{ m} \times 5.10 \text{ m} \times 1.75 \text{ m}$

Dimensiones de los muros de concreto = $0.50 \text{ m} \times 1.34 \text{ m}$

Peso específico del concreto = 2.4 ton/m^3

Peso específico del relleno = 1.76 ton/m^3

Coefficiente modificado de compresión elástica uniforme para carga de impacto: $C'_u = 2 C_u$

Coefficiente de restitución elástica: $e = 0.5$

Coefficiente que toma en cuenta la presión de contacto y las fuerzas de fricción: $\eta = 0.65$

REQUERIMIENTOS PARA EL DISEÑO

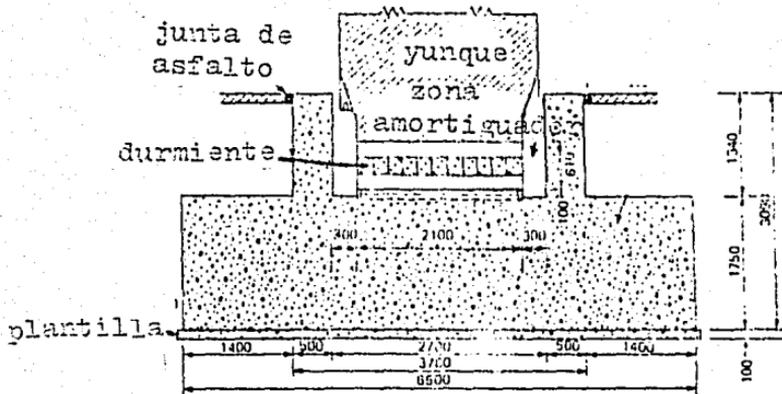
Los requerimientos principales para un diseño satisfactorio de la cimentación son:

- 1.- Las amplitudes de vibración de la cimentación y el yunque deben estar dentro de los límites permisibles.
- 2.- Los esfuerzos dinámicos en el suelo y en el amortiguador deben estar dentro de los límites permisibles.

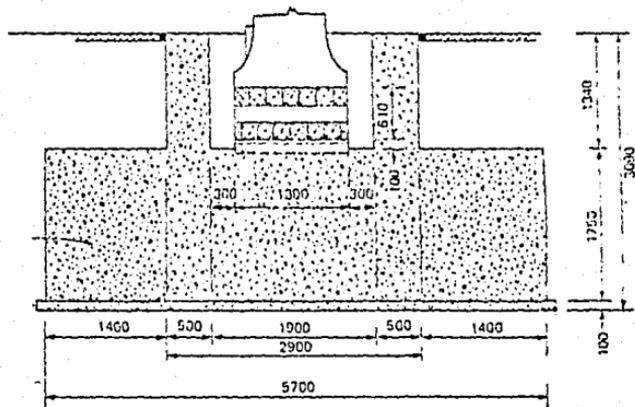
De acuerdo a Barkan y a las especificaciones Indias los siguientes son límites permisibles para amplitudes de vibración:

- Z1 =amplitud de la cimentación = 1.0 - 1.2 mm.
- Z2 =amplitud del yunque = 1.0 mm. para martillos de 1 ton.
= 2.0 mm. para martillos de 2 ton.

De acuerdo a las especificaciones Indias el límite permisible para esfuerzo en madera cargada perpendicularmente a la fibra es 400 ton/m² en compresión.



SECCION DE LA CIMENTACION DEL MARELLO



VISTA LATERAL DE LA CIMENTACION DEL MARTILLO

CALCULOS

- 1.- Area de contacto del suelo y peso de la cimentación.

En las figuras se muestran las dimensiones propuestas de la cimentación.

Area de la cimentación en contacto con el suelo:

$$A_1 = 6.50 \times 5.70 = 37.05 \text{ M}^2$$

Peso de la cimentación y el relleno

$$\text{Volúmen del bloque} = 6.50 \times 5.70 \times 1.35 = 64.8375 \text{ M}^3$$

$$\begin{aligned} \text{Volúmen de muros} &= 2 \times 3.70 \times 0.50 \times 1.34 = 4.958 \text{ M}^3 \\ &2 \times 1.90 \times 0.50 \times 1.34 = 2.546 \text{ M}^3 \\ &= 72.3415 \text{ M}^3 \end{aligned}$$

$$\text{Peso del concreto} = 72.3415 \times 2.40 = 173.62 \text{ ton}$$

$$\begin{aligned} \text{Volumen del relleno} &= 3 \times 6.50 \times 1.40 \times 1.34 = 24.40 \text{ M}^3 \\ &2 \times 1.90 \times 1.40 \times 1.34 = 10.80 \text{ M}^3 \\ &= 35.20 \text{ M}^3 \end{aligned}$$

$$\text{Peso del relleno} = 35.20 \times 1.76 = 62.20 \text{ ton}$$

Peso total de la cimentación y relleno:

$$P = 173.62 + 62.20 = 235.82 \text{ ton}$$

$$\text{Masa total} = M_1 = \frac{P}{g} = \frac{235.82}{9.81} = 24 \text{ ton} \frac{\text{seg}^2}{\text{M}}$$

2.- Frecuencias naturales del sistema cimentación-martillo.

El módulo de elasticidad del amortiguador: $E = 5 \times 10^4 \text{ ton/M}^2$

Espesor del amortiguador: $t = 0.61 \text{ m}$

Coefficiente de rigidez del amortiguador: $K_2 = \frac{EA_2}{L}$

$$K_2 = \frac{5 \times 10^4 \times 2.73}{0.61} = 22.4 \times 10^4 \text{ ton/m}$$

Masa del yunque y la estructura: $M_2 = \frac{34.3}{9.81} = 3.5 \text{ ton seg}^2/\text{m}$

El límite de la frecuencia natural del yunque sobre el amortiguador es: $\omega_{na}^2 = \frac{K_2}{M_2} = \frac{22.4 \times 10^4}{3.5} = 6.4 \times 10^4 / \text{seg}^2$

$$C_u = 1.1325 \times 10^3 \text{ ton/m}^3$$

$$C_u' = 2C_u = 2 \times 1.1325 \times 10^3 \text{ ton/m}^3 = 2.265 \times 10^3 \text{ ton/m}^3$$

Coefficiente de rigidez del suelo: $K_1 = C_u' A_1$

$$K_1 = 2.265 \times 10^3 \times 37.05 = 8.4 \times 10^4 \text{ ton/m}$$

La frecuencia natural límite del sistema: ω_{nL}

$$\omega_{nL}^2 = \frac{K_1}{m_1 + m_2} = \frac{8.4 \times 10^4}{24 + 35} = 0.305 \times 10^4 / \text{seg}^2$$

$$\eta = \mu = \frac{M_2}{M_1} = \frac{3.5}{24} = 0.1458$$

Las dos frecuencias naturales del sistema combinado están dados por: $\omega_{n1,2}^2 = \frac{1}{2} [(1+\mu)(\omega_{na}^2 + \omega_{nL}^2)] \pm$

$$\sqrt{[(1+\mu)(\omega_{na}^2 + \omega_{nL}^2)]^2 - 4(1+\mu)(\omega_{nL}^2 \omega_{na}^2)}$$

$$\omega_{n1,2}^2 = \frac{1}{2} [(1+0.1458)(6.4 \times 10^4 + 0.305 \times 10^4)] \pm$$

$$\sqrt{[(1+0.1458)(6.4 \times 10^4 + 0.305 \times 10^4)]^2 - 4(1+0.1458)(6.4 \times 10^4)(0.305 \times 10^4)}$$

$$\omega_{n1}^2 = 7.395 \times 10^4 / \text{seg}^2$$

$$\omega_{n1} = 2.71 \times 10^2 / \text{seg}$$

$$\omega_{n2}^2 = 0.295 \times 10^4 / \text{seg}^2$$

$$\omega_{n2} = 0.54 \times 10^2 / \text{seg}$$

3.- Velocidad de caída del martillo antes del impacto:

$$V_{t1} = \sqrt{\frac{2g(W_0 + A_c P)h}{W_0}}$$

$$V_{t1} = \sqrt{\frac{2(9.81)(1.55 + 0.129 \times 70)(0.9)}{1.55}} = 7.13 \text{ m/seg}$$

4.- Velocidad del yunque después del impacto:

$$V_a = \frac{1 + e}{1 + \frac{W_e}{W_0}} V_{t1}$$

$$V_a = \frac{1 + 0.5}{1 + \frac{34.2}{1.55}} 7.31 = 0.463 \text{ m/seg}$$

5.- Amplitud de vibración de la cimentación

$$Z_1 = \frac{(\omega_{na}^2 - \omega_{nz}^2)(\omega_{na}^2 - \omega_{n1}^2)}{\omega_{na}^2(\omega_{n1}^2 - \omega_{nz}^2)\omega_{nz}} V_a$$

$$Z_1 = \frac{(6.4 \times 10^4 - 0.295 \times 10^4)(6.4 \times 10^4 - 7.395 \times 10^4)}{6.4 \times 10^4 (7.395 \times 10^4 - 0.295 \times 10^4) 0.54 \times 10^2} 0.463 = 1.144 \text{ mm}$$

6.- Amplitud de vibración del yunque

$$Z_2 = \frac{(\omega_{na}^2 - \omega_{n1}^2)}{(\omega_{n1}^2 - \omega_{nz}^2)\omega_{nz}} V_a$$

$$Z_2 = \frac{(6.4 \times 10^4 - 7.395 \times 10^4)}{(7.395 \times 10^4 - 0.295 \times 10^4)(0.54 \times 10^2)} (0.463) = -1.195 \text{ mm}$$

Estos valores están dentro de los límites permisibles.

Esfuerzo dinámico en el amortiguador

$$\sigma_2 = \frac{K_2 (Z_1 - Z_2)}{A_2}$$

$$\sigma_2 = \frac{22.4 \times 10^4 (1.14 + 1.195) 10^3}{2.73} = 192 \text{ ton/m}^2$$

Está dentro de los límites permisibles.

V. PROCEDIMIENTOS CONSTRUCTIVOS

Para la construcción de la cimentación de un martillo, generalmente se toma el siguiente procedimiento:

La excavación se hace de acuerdo a las dimensiones del bloque de cimentación usando maquinaria y afinando con gente.

Para la plantilla se usa concreto pobre de un $f'c = 100 \text{ Kg/cm}^2$ con un espesor de 10 cm.

En el armado del bloque se refuerza a lo largo de los tres ejes y también en forma diagonal para prevenir esfuerzos cortantes. Se debe considerar que por cada m^3 . de concreto se coloquen mínimo 25 kg. de refuerzo.

La cimbra puede ser metálica o de madera colocada de acuerdo a las dimensiones y secciones de la cimentación.

Las anclas para el montaje del martillo se dejaron embebidas en el concreto con una longitud mínima de 40 veces el diámetro.

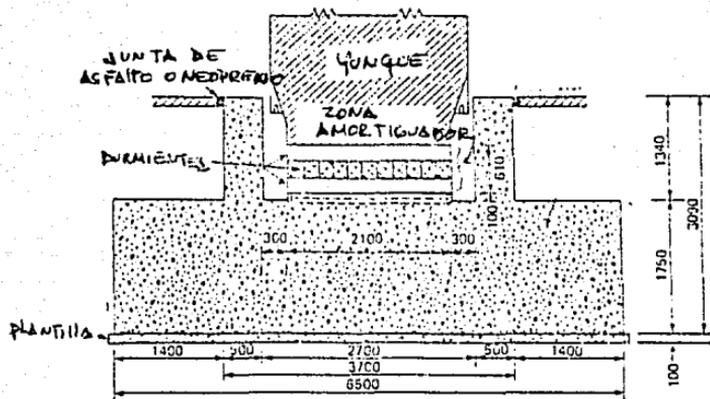
El bloque de cimentación debe colarse monolíticamente

dejando recubrimientos de 5 cms. en cada lado y usando agregados máximos de 20 cms., inmediatamente después se colarán los muros tratando de evitar la junta de construcción.

Si no se puede evitar la junta de construcción deben tomarse las siguientes medidas:

Pernos de 12 a 16 mm. de diámetro, centrados a 60 mm. deben ser embebidas al menos 30 cm. de profundidad en ambos lados de la junta. Antes de colocar el concreto nuevo la superficie debe ser asperzada, limpiada y lavada con un chorro de agua y después cubrir la superficie con 2 cms. de espesor de mortero cemento-arena 1:2.

Para el amortiguador de madera se usarán durmientes colocados en forma alternada y de forma que queden cargando perpendicularmente a la fibra del yunque.



SECCION DE LA CIMENTACION DEL MARTILLO

VI. CONCLUSIONES

El propósito del presente trabajo es el de presentar de manera breve los diferentes criterios en torno a la cimentación de máquinas, técnica apasionante de por sí en tanto que conjuga la aplicación por una parte, de los principios activos de la física, en la manifestación sinérgica de fuerzas y funciones, resistencia de los materiales y la distribución de la carga a lo largo de una superficie determinada y, por otra parte, de las matemáticas más allá de la pura abstracción.

La cimentación de maquinaria se ha desarrollado a la par con el avance tecnológico, considerando la creación de nuevas máquinas con incremento de vibraciones e impacto.

El desarrollo y equipamiento de los laboratorios especializados en mecánica de suelos contribuye cada vez más a aportar soluciones acertadas a los diferentes problemas que se nos plantean en el ejercicio profesional y específicamente en torno a la cimentación de maquinaria.

La aportación que en el ámbito de la construcción se ha realizado a nivel internacional nos ha permitido actualizar los métodos tradicionales y aprovechar al máximo las

perspectivas de los nuevos aportes en este campo, es por ello que hago especial énfasis en los métodos de protección, que a mi juicio hacen un papel relevante en la cimentación de máquinas de una manera práctica y muy económica.

El balanceo dinámico es uno de los métodos para reducir vibraciones que considero más importante por ser el más usado en la industria y relativamente económico, ya que es un hecho comprobado que el 70% de toda vibración que llega a encontrarse en la maquinaria en general, es debido a desbalance.

Asimismo, considero insoslayable la importancia y trascendencia de la cibernética en los métodos técnicos de la construcción. El uso de ordenadores o computadoras, no solo nos permite la agilización en cuanto al procedimiento de cálculo, sino que nos permite considerar la concurrencia de un sinnúmero de factores que se hacen difíciles por la cantidad de variables - máquinas, estructura, suelo-, la proyección, análisis y diseño de la cimentación idónea para un determinado tipo de maquinaria.

El avance científico y tecnológico al que he hecho referencia, la importancia de la cibernética cuya partici-

pación en materia de análisis, proyección, diseño y construcción es cada vez más preponderante, han encontrado en la industria moderna un campo fértil para revolucionar radicalmente el campo de la construcción, toda vez que la aportación de aditivos, cementos de mejor calidad y nuevas técnicas han permitido el desarrollo óptimo que los métodos de construcción tienen en la actualidad, a tal grado, que nos es posible evitar las juntas de construcción, tan indeseables en este tipo de cimentación.

BIBLIOGRAFIA

- * BARKAN D.D. "DYNAMICS OF BASES AND FOUNDATIONS" MC. GRAW-HILL (1962).
- * SETO W.W. "VIBRACIONES MECANICAS" MC. GRAW-HILL (1971)
- * PRAKASH SHAMSHER "SOIL DYNAMICS" MC. GRAW-HILL (1981)
- * NIETO-RESENDIZ "CRITERIOS DE DISEÑO PARA CIMENTACIONES DE MAQUINARIA" INST. DE INGENIERIA U.N.A.M., (1967).
- * ALBERRO-NIETO "APENDICE A CRITERIOS DE DISEÑO PARA CIMENTACION DE MAQUINARIA" U.N.A.M., (1967).
- * CRESPO VILLALAZ "MECANICA DE SUELOS Y CIMENTACIONES" (1971).
- * DUNHAM C.W. "CIMENTACIONES DE ESTRUCTURAS" MC. GRAW-HILL (1968).
- * BOWLES J.E. "FOUNDATIONS ANALYSIS AND DESING" MC.GRAW HILL (1977).

* RICHART-HALL-WOODS "VIBRATIONS OF SOIL AND FOUNDATIONS" PRENTICE-HALL (1970).

C.F.E. "VIBRACIONES MECANICAS".