

16  
2ej

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO

ESCUELA NACIONAL DE ESTUDIOS PROFESIONALES  
" ARAGON "

" ACCION DINAMICA EN SILOS "

T E S I S   P R O F E S I O N A L.  
QUE PARA OBTENER EL TITULO DE:  
INGENIERO CIVIL

P R E S E N T A

J O A Q U I N   G U T I E R R E Z   V E G A

**TESIS CON  
FALSA DE ORIGEN**

San Juan de Aragon, Edo. de México, 1988.



Universidad Nacional  
Autónoma de México



## **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.

C O N T E N I D O

CAPITULOS	PAG.
I. Introducción .....	2
II. Antecedentes .....	5
III. Bases de Diseño .....	13
IV. Acciones Dinámicas en Silos.....	16
V. Estudios Teóricos de Vibración en Silos .....	21
VI. Estudios Experimentales en Modelos .....	38
VII. Resultado del Estudio Experimental .....	96
VIII. Comentarios Finales .....	123
IX. Referencias .....	131
Apéndice .....	133

## I.- INTRODUCCIÓN

La irregularidad del rendimiento de las cosechas y de su distribución en el mundo, ha provocado siempre un consumo desigual de cereales.

Por ello ha sido preciso construir estaciones de almacenaje que permitan asegurar un consumo más uniforme de los productos.

En la actualidad se tiende a generalizar este almacenamiento, que se efectúa preferentemente en silos.

Por lo tanto los silos son estructuras destinadas al almacenamiento de materiales granulares o de polvos, como pudieran ser toda clase de granos, harinas, cementos, etc.

Los silos se construyen generalmente de acero o concreto reforzado y se componen de celdas yuxtapuestas de secciones variables (las más comunes son las circulares y octagonales como se muestra en la figura 1.1) y son de gran altura, terminadas en su base por tolvas de vaciado y cerradas en su parte superior por una losa, sobre la cual se instalan los aparatos de llenado de las celdas.

Respecto a la cimentación, comúnmente se emplean dos tipos ligeramente distintos :

a) Aquellos donde las paredes de los silos se apoyan sobre una losa soportada por columnas (figura 1.2) las cuales a su vez descansan sobre una losa de cimentación; y

b) Aquellos donde las paredes se apoyan directamente sobre la losa de cimentación, dejando solamente algunos huecos en las paredes de los silos para dejar pasar el material de un lado a otro.

En ambos casos, la losa de cimentación se puede apoyar sobre pilotes, si es que las condiciones del suelo así lo requieren.

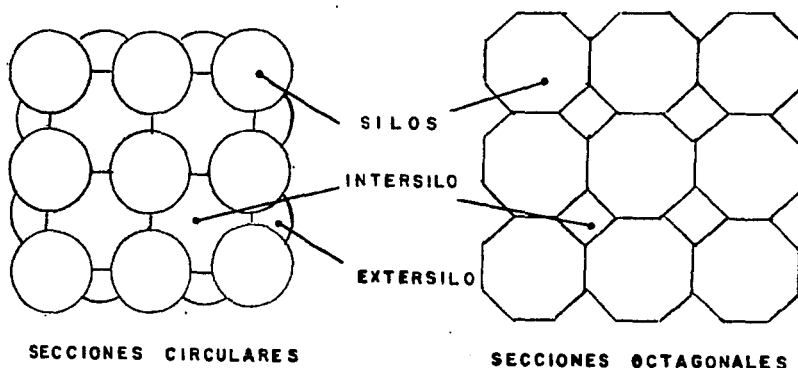


FIG. 1.1 BATERÍA DE SILOS

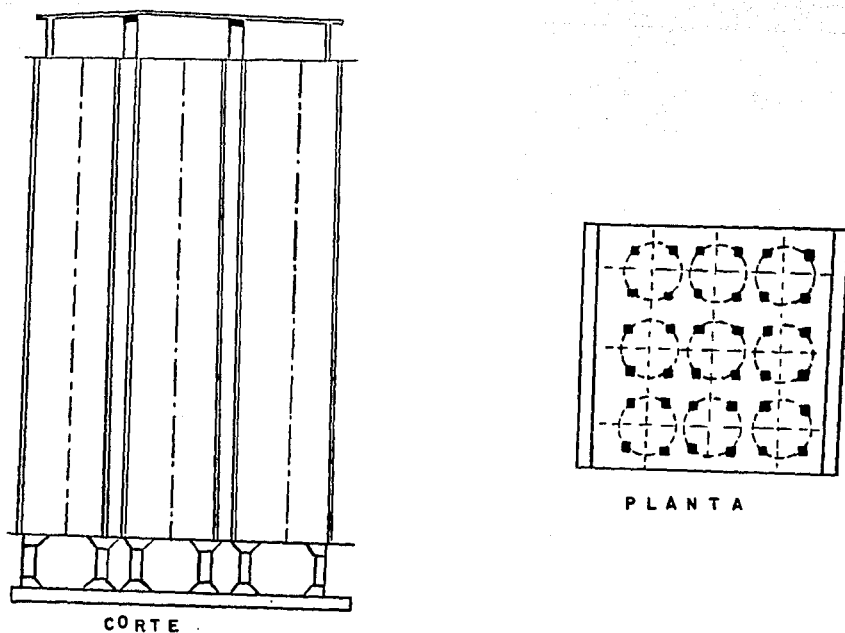
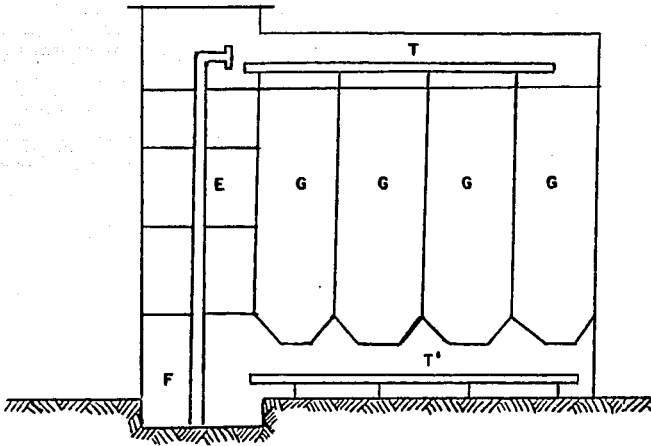


FIG. 1.2 BATERÍA DE SILOS SOBRE COLUMNAS DE CONCRETO

Un esquema general de una instalación de silos se muestra en la figura 1.3 y comprende los siguientes elementos :

- Una fosa de recepción, F , en la cual se vierten los materiales a su llegada.
- Un elevador, E , que toma los granos de la fosa los cuales eleva al piso situado por encima de las celdas.
- Una cinta transportadora superior, T , que conduce los granos desde el punto de vertido del elevador y los lleva hasta el orificio de llenado de las celdas.
- Las celdas de los silos, G , propiamente dichas.
- Una cinta transportadora inferior, T' , que recoge el grano procedente de las celdas y lo deposita a medios de transporte para la distribución del material almacenado.



**FIG. 1,3      INSTALACIÓN DE UNA BATERÍA  
DE      SILOS**

## 11.- ANTECEDENTES

En el tema de los silos existen aspectos teóricos que se deben de investigar a fin de evitar deformaciones que resultan ser excesivas: grietas, fallas, hundimientos y explosiones que aparecen en muchas instalaciones y prácticamente en todos los países industrializados; rara es la instalación en que se manejen productos granulares y pulverulentos, en que no hayan tenido problemas en sus silos.

Varios son los autores que se han dedicado al estudio de los silos; sin embargo poco se ha escrito sobre el comportamiento sísmico de estas estructuras.

Es el objetivo principal del presente trabajo, describir el comportamiento dinámico de un silo cuando es sometido a la acción de un sismo.

Muchas son las fallas que se pueden presentar en una estructura de silos, como pueden ser:

a) Fallas en la cimentación. La cimentación es la parte de la estructura que es capaz de transmitir las cargas de una superestructura al suelo firme.

Al igual que cualquier otro material, el suelo puede fallar si se le impone una carga muy grande y la rigidez angular de la cimentación es baja

b) Sobrepresiones de vaciado. Cuando un silo se llena aparecen sobre las paredes laterales presiones horizontales, denominadas activas o de llenado y que son muy diferentes e inferiores a las hidrostáticas.

Las presiones que causan averías, por no tener en cuenta los fenómenos dinámicos que aparecen durante el vaciado, son las llamadas presiones de vaciado

c) Vaciado excéntrico. En los silos cilíndricos, con bocas de salidas excéntricas, aparecen problemas de deformaciones en las paredes debidas a la asimetría del flujo de vaciado. Así mismo crea durante el vaciado cargas horizontales desigualmente distribuidas a lo largo del perímetro y en toda la altura del silo

d) Fuerzas de rozamiento. Las fuerzas de rozamiento que actúan contra las paredes de un silo deben considerarse para evitar problemas serios de deformación que se presentan en muchas instalaciones. Debido a la amplia variación de estas fuerzas se han de conocer sus valores absolutos máximos. Cuando un silo es metálico y de chapa lisa, en los puntos de conexión de las chapas que se realiza mediante soldadura, aparecen tensiones residuales, que unidas a las fuerzas de rozamiento, producen a la larga deformaciones permanentes. Las fuerzas de rozamiento actúan igualmente sobre todos los elementos que normalmente se colocan en el interior de un silo

e) Presiones sobre el fondo. La determinación y conocimiento de presiones sobre el fondo afecta de manera directa el cálculo de las tolvas, provocando deformaciones las cuales se presentan por no tener en cuenta las presiones máximas sobre el fondo

f) Tensiones de origen térmico. En muchas ocasiones el producto a ensilar entra a temperaturas muy altas, lo que produce una diferencia de temperaturas entre las caras interior y exterior de la pared del silo ocasionando tensiones, que a su vez pueden provocar fracturas en las paredes del silo

g) Explosiones en los silos. Investigaciones realizadas en laboratorios y el estudio de las grandes explosiones ocurridas en el mundo, indican que el polvo que se encuentra en suspensión en el aire es altamente explosivo. Se puede afirmar que el polvo de muchos materiales combustibles al mezclarse con el aire puede explotar. Por otro lado no todos los polvos son altamente peligrosos

h) Efecto del viento. En este tipo de instalaciones los esfuerzos del viento son altamente peligrosos, cuando el silo se encuentra principalmente vacío. El viento produce presión y succión en las paredes del silo, provocando un posible volteo de la estructura. Los esfuerzos del viento pueden producir deformaciones y abollamientos hacia el centro en silos vacíos

i) Efectos del sismo. El sismo produce a las paredes del silo presiones dinámicas ocasionadas por el material almacenado, produciendo grietas horizontales que se localizan aproximadamente a un tercio de la altura del silo, así como daños en la torre de maquinaria o volteo general

Para todos los tipos de fallas mencionados, en la referencia 2 se presentan casos reales que han ocurrido en diferentes silos, a excepción de las fallas ocurridas por sismo.

Después de mencionar los tipos de fallas más comunes describiremos a continuación cuales son las causas más frecuentes de este tipo de fallas en los silos :

1) En cimientos, por la concentración de altas cargas en superficies relativamente pequeñas. Tristemente célebres a lo largo de toda la historia de la construcción de silos, son una serie de hundimientos y serias deformaciones aparecidas en las instalaciones, debidas al cálculo indebido de la cimentación. En la referencia 3 se describen los casos más comunes e importantes que se han presentado

2) Gran esbeltez de la estructura azotada por el viento y cargadas de una forma asimétrica. El no tomar en cuenta en el diseño la esbeltez de la estructura, ocasiona fallas de volteo considerables producidas por las succiones y presiones del viento

3) Conocimiento dudoso de las presiones reales que aparecen en el silo durante el llenado y el vaciado. Las presiones dinámicas que aparecen durante el vaciado y que son mayores a las estáticas, han producido gran polémica debido a la falta de acuerdo que existe entre los especialistas para determinar los valores de estas presiones de vaciado, en función de las presiones estáticas de llenado y que fueron perfectamente definidas por Janssen (ref. 1)



4) Falta de experiencia en la planificación y análisis estático de tales estructuras. Las presiones en las paredes de un silo dependen fundamentalmente de:

- Peso específico del producto ensilado
- Ángulo interno de rozamiento del producto ensilado
- Ángulo de rozamiento con la pared de la celda
- La forma del silo

La conocida fórmula de Janssen, nos indica que la presión estática vertical se determina como:

$$q = \frac{\gamma R}{M' K} \left[ 1 - e^{-M' K Y / R} \right]$$

$\gamma$  peso volumétrico del material almacenado

R Radio hidráulico

$M'$  Coeficiente de fricción entre el material almacenado y la pared

K Relación entre p y q

Y Altura de la superficie del material almacenado al punto en estudio

q Presión estática vertical debida al material almacenado

Así mismo, la presión horizontal estática debida al material almacenado se define por:

$$P = q K$$

$$K = \frac{1 - \operatorname{sen} \rho}{1 + \operatorname{sen} \rho}$$

$\rho$  Ángulo de fricción interna del material almacenado, aproximadamente igual al ángulo de reposo

Estas fórmulas han sido usadas durante muchos años por ingenieros y calculistas, donde el factor K, para diferentes países toma diferentes valores. Así mismo, esta teoría se debe modificar para tomar en consideración las acciones dinámicas.

Mencionaremos a continuación las principales fallas de origen sísmico que se han presentado en el mundo.

Una de las principales evidencias de falla causada por un sismo sucedió en Chile (ref. 4) donde un par de silos de 15 m. de alto y 4.5 m. de diámetro sufrieron daños a 5 m. de sus bases; esta falla consistió en una fisura horizontal que cortó ambos silos.

Se cree que fué causada por la poca cuantía de refuerzo longitudinal, además, por la evidencia presentada en la misma reflicencia, se sospecha que la falla fué acentuada por la presencia de una junta fría de la construcción en las paredes de los silos.

Durante el mismo sismo, otro silo de 15 m. de alto y 6 m. de diámetro, fué dañado severamente; este silo sufrió una falla completa de cortante a 4 m. arriba de su base. Como en el caso de los dos silos anteriores la grieta ocurrió en la junta de construcción. varias varillas de refuerzo longitudinal se rompieron y mostraron grandes deformaciones por fluencia; esto prueba los considerables esfuerzos de tensión a que se someten los silos durante las oscilaciones inducidas por los sismos.

Durante el sismo de Rumania (ref. 5) una batería de silos con torre de maquinaria presentó daños en la zona donde terminan los silos, justamente en la base de la torre (fig. 2.1).

También en Rumania otra batería de silos estuvo sometida al sismo de 1977, en este caso la torre no fué construida directamente sobre la batería de silos, sino que se construyó a un lado (fig. 2.2).

La única parte que resulto dañada de ésta segunda batería fue una estructura ligera que se construyó en su parte superior la cual en algunas partes presentó colapso total de la cubierta superior (fig. 2.3).

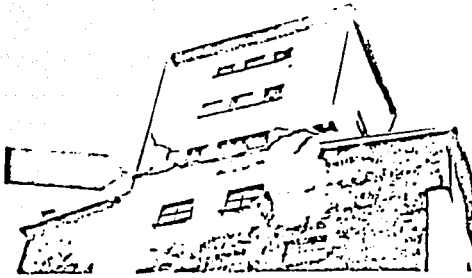
Las fallas de las partes superiores de estas dos baterías se debieron probablemente a que la estructura de la parte superior resultó flexible, comparada con la construcción rígida de la batería de silos. Esto llevo a una respuesta dinámica amplificada de dicha parte, fenómeno conocido como de "chicoteo".

La falla del piso superior de la última batería de silos comentada, fue muy marcada entre las conexiones de las columnas de concreto reforzado y las paredes de los silos; muy probablemente se debieron a que en las uniones entre el techo precolado y las columnas no fueron diseñadas para transmitir momentos flexionantes, por lo que las columnas tuvieron que resistir las fuerzas sísmicas laterales como un voladizo. Además, se observó que el anclaje del refuerzo de éstas columnas en las paredes de los silos fué insuficiente.

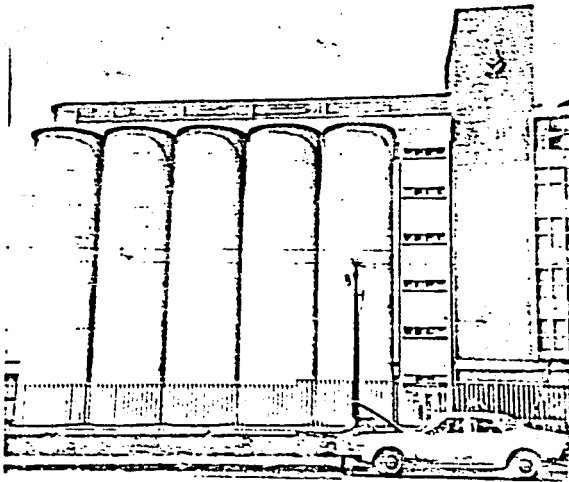
No se encontraron grietas verticales en las paredes de los silos de las dos baterías, esto puede llevar a sospechar que las sobrepresiones del material almacenado no excedieron a los valores de las presiones que se producen durante el vaciado de los silos.

Recientemente, durante los sismos de septiembre de 1985 en México, se tuvo noticia de dos baterías de silos que resultaron dañadas. El primer grupo de silos no tenía torre de maquinaria y presentó el mismo tipo de falla descrita en los sismos de Chile, es decir, se formó una grieta horizontal debida probablemente a un efecto combinado de flexión y cortante (fig. 2.4).

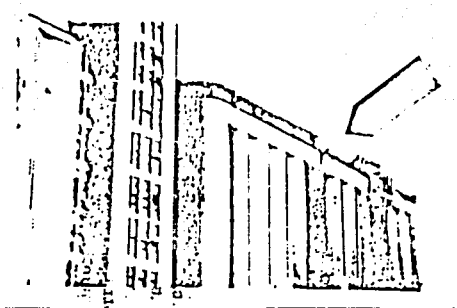
La segunda batería de silos si tenía torre de maquinaria, construida directamente sobre la batería de silos, esto produjo que durante el sismo se presentará una falla en la base de la torre (muy similares a los de Rumania) causada también por una amplificación de la respuesta en la parte superior (fig. 2.5).



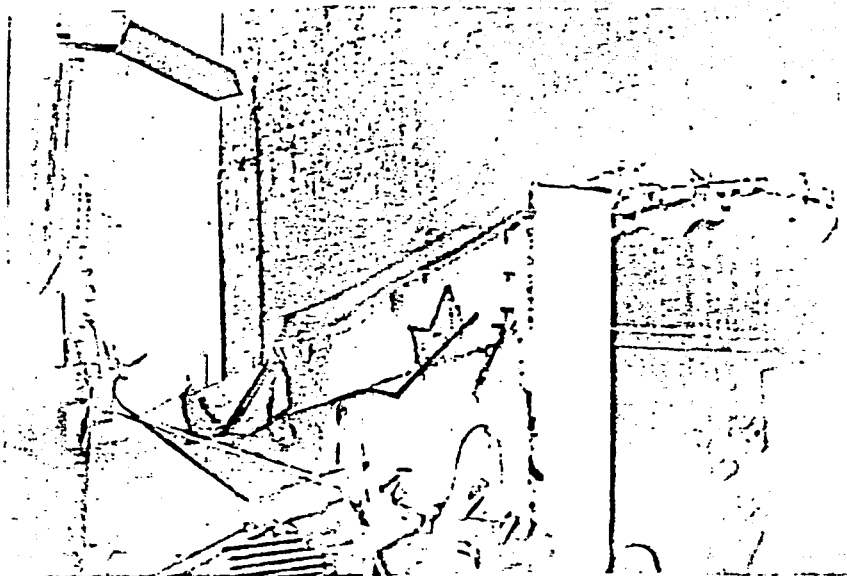
**FIG. 2.1** FALLA EN LA BASE DE LA TORRE DE MAQUINARIA



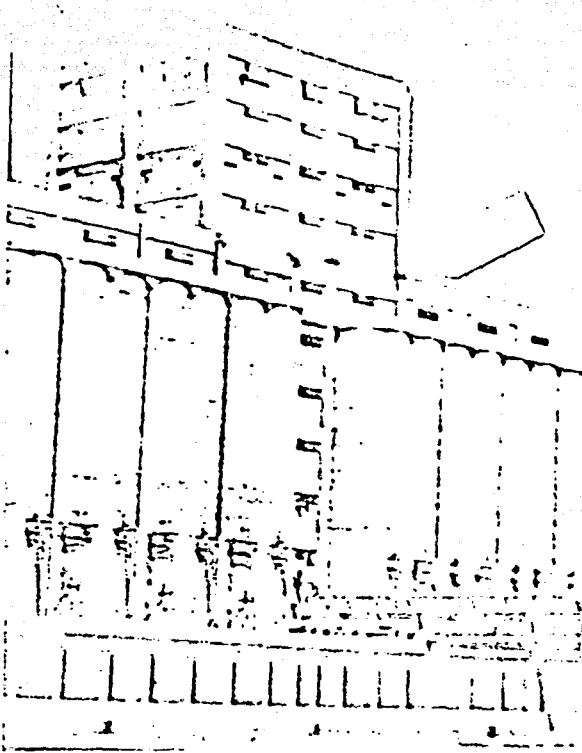
**FIG. 2.2** TORRE CONSTRUIDA A UN LADO DE LA BATERÍA



**FIG.2.3 FALLA DE LA ESTRUCTURA LIGERA DE LA PARTE SUPERIOR DE LA BATERÍA DE SILOS**



**FIG. 2,4 FALLA DE SILOS EN MÉXICO**



**FIG.2.5 FALLA DE LAS COLUMNAS DE LA TORRE DE MAQUINARIA .**

Se piensa que la falla se vió acentuada debido a que en la parte donde terminan los silos e inicia la torre, se efectuaron los traslapes de todas las varillas de las columnas que soportan la torre. Mucho debió haber influido el hecho de que en la misma zona, se encontró una junta fría de construcción.

Al igual que los silos de Rumania en estas baterías construidas en México, no se observaron grietas verticales, que indicaran que las presiones del grano hayan excedido las sobrepresiones de vaciado.

De los casos descritos anteriormente, se pueden mencionar algunas conclusiones importantes respecto al modo de falla que los sismos producen :

1. Las grietas que llegan a presentarse en las paredes de los silos son horizontales y se localizan aproximadamente a un tercio de la altura de éstos. Las grietas verticales se deben principalmente a sobrepresiones causadas por el material almacenado, en general sin relación con las fuerzas sísmicas.

2. La presencia de juntas frías en las paredes de los silos son causa muy probable de fallas de cortante, por ello es preferible hacer un colado continuo empleando cimbra deslizante.

3. El refuerzo vertical de los silos debe calcularse para que resista los esfuerzos de tensión provocados por la flexión longitudinal y no solamente por los esfuerzos originados por los cambios de temperatura.

4. Cuando la torre de maquinaria está construida directamente sobre la batería de los silos, deben tomarse en cuenta los efectos debidos a la amplificación dinámica que produce el cambio de rigideces. En general ésta amplificación debe preverse para cualquier estructura que sea flexible proyectada sobre la batería.

5. Se debe prever un anclaje adecuado de las varillas en las columnas de la estructura superior (de la torre) en las paredes de los silos y el traslape de estas varillas no debe localizarse en una misma zona. Esto último también se aplica al refuerzo vertical en las paredes de los silos.

6. Aunque no se encontraron pruebas de silos que fallaron por volteo en el momento de un sismo, el gran número de fallas producidas por una falta de capacidad del terreno sugiere que deben revisarse los incrementos de presión sobre el suelo, que los momentos de volteo pueden producir.

### III.- BASES DE DISEÑO

En el diseño de silos se considera la necesidad de tomar en cuenta las acciones siguientes :

1. Peso propio de la estructura y de sus accesorios, incluyendo la tapa y la estructura de soporte
2. La presión interior del material almacenado. La presión interior del material almacenado se puede determinar por el procedimiento de Reimbert (ref. 1).

Las presiones del material a considerar incluirán no solo las presiones estáticas, sino todos los posibles incrementos de presión que se pueden producir debido a :

- Efectos de llenado del silo
- Incrementos de presión debidos a la descarga

Se produce este incremento de presión cuando el material se mueve según el llamado flujo de "embudo". Esta condición es la normal y consiste en que el material fluye hacia la salida por un conducto más o menos cónico, el cual se puede formar en el resto del material que permanece en reposo.

Para que se presente el "flujo de embudo", la abertura de salida debe ser suficientemente amplia, de modo que asegure sin obstrucción el paso del material por gravedad. Si las paredes de la tolva de descarga son lisas y con mucho declive, se forma el llamado "flujo másico", en que al salir parte del material, se pone en movimiento todo el contenido del depósito; esta condición así mismo causa grandes incrementos de presión

- Formación de bóvedas. Debe tomarse en cuenta la posible formación de bóvedas en el material, pues cuando una bóveda falla se produce un fuerte impacto que puede dañar a la estructura. Las bóvedas se forman cuando la abertura de salida no es suficientemente grande para asegurar el flujo libre por gravedad del material, o cuando el depósito se descarga a la máxima velocidad que permite el sistema

- Fenómeno de aeración. Consiste en la disminución del peso volumétrico y de los ángulos de fricción a causa del aire que queda en la masa del material. Durante el llenado, un material fino atrapa un exceso de aire; si la velocidad de llenado es baja, el aire escapa y los coeficientes de fricción y el peso volumétrico finales se alcanzan rápidamente; si la velocidad de llenado es alta, el material tiende a comportarse como un fluido, con ángulos de fricción casi nulos

- Descarga excéntrica. También produce cambios en la presión lateral. Probablemente la presión aumenta en un lado y disminuye en el otro.

Aunque la carga sea concéntrica se puede generar presiones desiguales alrededor del perímetro del depósito, si la superficie del material almacenado es asimétrica. Esto puede ocurrir, por ejemplo, si el material que entra no cae verticalmente, o si existen obstrucciones internas que favorezcan un flujo más rápido en un lado que el otro

3. Carga viva. La carga viva sobre la tapa de un silo se debe considerar de acuerdo a las especificaciones como las que se presentan en la referencia 6

4. Deformaciones y movimientos impuestos a la estructura tales como hundimientos diferenciales de los apoyos.

Al diseñar silos se debe tener presente la posibilidad de que ocurran flexiones. Estas flexiones se presentan en las paredes de los silos, en especial cuando alguna batería de silos algunos de éstos están llenos y otros vacíos; también puede ocurrir cuando el flujo del material almacenado cambia de flujo de embudo a flujo másivo. La magnitud de las flexiones puede aumentar al incrementarse la velocidad de descarga. También el material almacenado, en los silos internos o externos, puede provocar flexión en las paredes.

En una batería de silos se pueden generar fuerzas que tienden a separar los depósitos entre sí, cuando algunos de ellos están llenos y otros vacíos

5. Efecto del cambio de temperatura, de contracciones y de flujo plástico

6. Efectos del viento. Los efectos del viento se toman en cuenta mediante presiones y succiones estáticas valuadas según un análisis por viento. Al revisar los esfuerzos verticales en la pared, en la estructura de soporte y en la cimentación, se supondrá el depósito lleno cuando actúa el viento. Para revisar la estabilidad general y las posibles tensiones en la cimentación, se supondrá que el viento actúa sobre el depósito vacío; así mismo, al revisar las flexiones horizontales de las paredes

7. Efectos del sismo. A fin de hacer una comparación con los resultados del presente trabajo, se presenta la forma en que actualmente se considera el efecto de un sismo en los silos mediante el reglamento del ACI 313-77.

Los silos a construir en zonas de sismo dadas en el reglamento unificado de especificaciones, serán proyectados y se construirán para soportar las fuerzas sísmicas laterales calculadas, usando las ecuaciones que a continuación se presentan :

Se supone que las fuerzas sísmicas pueden actuar en cualquier dirección.

Para calcular las fuerzas sísmicas en los silos, se debe usar como una carga efectiva móvil no menos del 80% del peso del material almacenado. El centroide de la carga móvil efectiva debe coincidir con el centroide del volumen real del material almacenado.



La fuerza sísmica lateral total o esfuerzo de cortante en la base se calcula con la fórmula :

$$H_e = Z \quad C_p \quad ( W_g + W_{eff} )$$

donde :

$H_e$  Esfuerzo de cortante en la base

$Z$  Factor de zona por terremoto igual a 1.0, 0.5 ó 0.25 para las zonas 3, 2 y 1 respectivamente (ver el reglamento de especificaciones unificadas)

$W_g$  Peso de la estructura

$W_{eff}$  Peso el material almacenado.

Todos los silos con material almacenado en el fondo y sujetos a carga sísmicas serán diseñados con  $C_p = 0.2$ , a menos de que un análisis dinámico demuestre una adecuada resistencia y estabilidad de la estructura con un valor menor de  $C_p$ , pero nunca menor que 0.10.

Los silos en los cuales las paredes se extienden hasta el suelo y el material almacenado descansa directamente sobre la tierra, serán tratados como tanques apoyados en tierra, con un  $C_p = 0.10$ .

Para casos intermedios, se puede obtener el valor de  $C_p$  por interpolación lineal.

#### IV.- ACCIÓN DINÁMICA EN SILOS

Las presiones dinámicas a las que son sometidos los silos, son las producidas por el movimiento del material almacenado en el silo; este movimiento es producido fundamentalmente por el llenado y el vaciado del silo, el debido a la acción de un sismo, a la acción del viento y al cambio térmico.

En el presente capítulo sólo estudiaremos las presiones dinámicas debidas al llenado y al vaciado del silo, en lo referente a la acción sísmica sobre el silo, se estudia en capítulos subsiguientes.

Comenzaremos por definir un estado activo y pasivo de presiones que se puede presentar.

En un estado activo de presiones, la presión máxima y principal actúa en la vertical, o encierra la dirección vertical, mientras que en un estado pasivo de presiones, la presión máxima actúa en la dirección horizontal.

El estado activo causa contracción vertical y entonces la contracción permite una expansión horizontal del sólido; mientras que el estado pasivo causa contracción horizontal y expansión vertical.

Consideremos la celda de la figura 4.1. A medida que se va llenando, la masa se contrae y se desarrolla un estado activo de presiones. Cuando la masa se contrae, se desliza a lo largo de las paredes. La masa no alcanza el estado plástico, pero está en un estado elástico de presiones, tanto en el cuerpo de la celda como en la tolva. En este estado elástico-activo, las presiones laterales siguen una curva de acuerdo con la fórmula de Janssen hasta que alcanza la tolva; hay aquí un incremento de presiones y a continuación las presiones decrecen linealmente hasta cero, en la boca de la salida de la tolva.

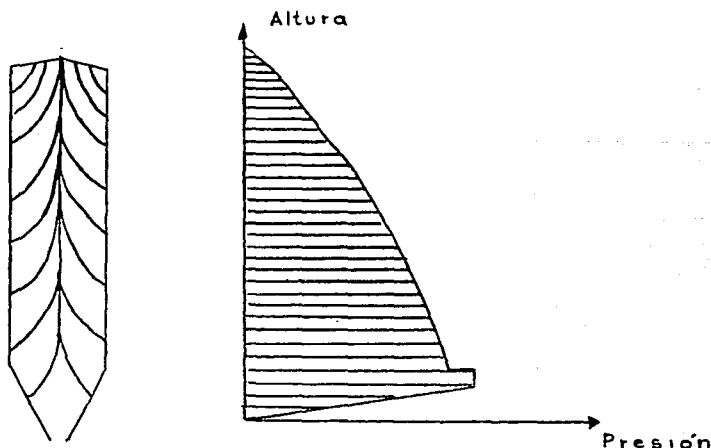


FIG. 4.1 VARIACIÓN DE LA PRESIÓN CON LA ALTURA  
DURANTE EL LLENADO DEL SILO

Las presiones antes definidas son las presiones dinámicas debidas al llenado y en general son menores que durante el vaciado.

Por otro lado sabemos que la variación del coeficiente de rozamiento grano-pared produce una variación de la presión lateral en las paredes del silo.

Idénticamente el coeficiente  $K$  (relación entre las presiones verticales y horizontales) produce una variación de las presiones laterales en función de los valores de  $K$ .

Se comprende que al iniciarse el vaciado, se rompa el equilibrio estático y varíen los coeficientes de rozamiento grano-pared y el coeficiente  $K$ .

Estos dos factores sumados pueden producir incrementos muy importantes en las presiones laterales.

Experimentos en modelos y silos reales han demostrado que las presiones horizontales sobre las paredes de las celdas aumentan sustancialmente durante el vaciado.

En la figura 4.2 se ven las variaciones de presión sobre las paredes de un silo durante el llenado y el vaciado, cuando se comparan con las de Janssen resulta una distribución irregular de presiones laterales.

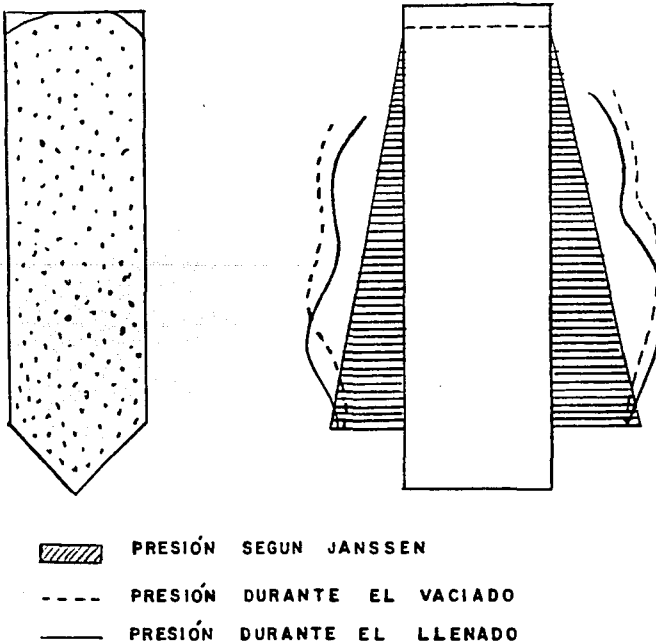


FIG. 4.2 VARIACIÓN DE LA PRESIÓN EN LAS PAREDES DEL SILO

En el momento de abrir la boca de salida (inicio del vaciado) se inicia el movimiento del producto granular, que puede ser clasificado en dos grupos fundamentales:

1) Flujo tipo masivo. Al abrirse la boca de salida toda la masa se pone en movimiento, esto trae como consecuencia la aparición de grandes incrementos en las presiones laterales durante el vaciado.

2) Flujo de tipo de embudo. Sólomente se pone en movimiento la zona central de la masa ensilada y en sentido vertical, a este flujo también se le llama de conducto o tubo. Se caracteriza por la ausencia de sobrepresiones durante el vaciado.

En primer lugar, en el flujo de embudo, existen sobrepresiones de vaciado y en segundo el flujo dinámico con toda la masa en movimiento y con la aparición de sobrepresiones de vaciado importantes.

Esto es muy importante en la forma y caudal de llenado que influye de forma decisiva para llenado lento, presiones más pequeñas que para llenado rápido.

En el caso de flujo de embudo, si se llena y vacía el silo con el mismo caudal, el material que permanece fuera del cono central de vaciado permanece estático siendo el material que entra en el silo el que a continuación sale.

A continuación se hace referencia a la determinación de flujo de vaciado en celdas y tolvas, mirando el flujo de una partícula individual, como camino para incrementar el caudal de vaciado.

Sabemos que el flujo de vaciado de productos cohesivos se divide en dos partes:

1) Iniciación de flujo

2) Mantenimiento de este flujo bajo la condición de conseguir un caudal determinado

En los materiales cohesivos, las presiones internas dentro de la masa ensilada, producen incrementos de compactación y como consecuencia la formación de bóvedas sobre la boca de descarga, que inducen a que el flujo de vaciado quede interrumpido.

La razón del incremento de presiones laterales puede conocerse mejor si se estudia el comportamiento del grano en el silo durante el vaciado. La figura 4.3 muestra sucesivos estados después de que la boca de salida de la tolva ha sido abierta.

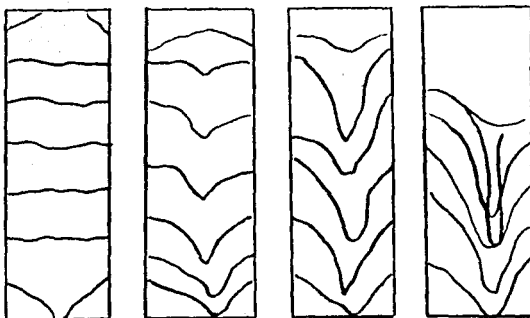


FIG. 4.3 MOVIMIENTO DEL GRANO EN EL VACIADO

El vaciado se puede realizar de diferentes maneras :

1. Canales de flujo. Es la parte de la masa de un sólido dentro de la cual todas las partículas están en movimiento al abrirse la compuerta de salida y producirse el flujo

2. Celdas de flujo másico. Cuando el canal de flujo coincide con las paredes y tolva de la celda, se dice que la celda es de flujo másico. Suponiendo que la boca de salida de la tolva es suficientemente grande para que el flujo suceda, el flujo másico requiere que se cumplan las siguientes condiciones :

a) La tolva debe ser suficientemente inclinada y lisa para que el campo de presiones del flujo se desarrolle dentro de la tolva

b) Las presiones ejercidas por el sólido, en la parte cilíndrica de la celda sobre el sólido en la tolva (presión vertical) debe ser iguales o mayores que las presiones radiales.

En la primera condición se establece un límite sobre la inclinación y el ángulo de rozamiento con la pared y se obtiene directamente de las ecuaciones de flujo.

La segunda condición se satisface cuando la fuerza total vertical ejercida en la unión de la celda con la tolva por el sólido, excede a la fuerza vertical total del campo radial de la tolva

3. Celdas de flujo de embudo. Cuando se produce el canal de flujo dentro del propio material y queda todo el material en reposo, excepto en el centro donde se mueve; existe en el contorno del embudo una zona de cizallamiento entre el material en movimiento y el material en reposo; a este tipo de flujo se le llama de embudo.

Celdas de flujo de embudo son aquellas en las que no se produce flujo másico, debido a que las tolvas no son suficientemente lisas e inclinadas. Entonces el flujo no escurre a lo largo de las paredes, sino solamente dentro del embudo en donde se forma la onda de sobrepresiones que actúa sobre el material que permanece estático alrededor del embudo.

Ahora bien, si el flujo de embudo toca a la pared de la celda en una altura determinada, la onda de sobrepresiones produce el efecto de carga concentrada, en éste punto de intersección con la pared de la celda

4. Vaciado excéntrico. Cuando se presenta un vaciado excéntrico aparecen sobrepresiones en el lado opuesto de la boca de salida y depresiones en el lado próximo a la boca de salida. Así mismo, aparecen problemas de deformaciones en las paredes de los silos.

Se debe tener en cuenta también como acción dinámica a la acción que producen las posibles formaciones de bóvedas en el material almacenado; cuando una bóveda falla, se produce un fuerte impacto que induce sobrepresiones sobre las paredes del silo.

Las bóvedas se forman cuando la abertura de salida no es suficientemente grande para asegurar el flujo libre por gravedad o cuando el depósito de descarga, trabaja a la máxima velocidad que permite el sistema.

## V.- ESTUDIOS TEÓRICOS DE VIBRACIÓN EN SILOS

Han sido muy pocos los estudios experimentales que se han realizado, para poder desarrollar una teoría que permita evaluar en una forma precisa, los cambios de presiones que producen los granos que almacena un silo sobre las paredes de éste, al ser sometido a la acción sísmica.

Esta tarea de desarrollar una teoría no es fácil, ya que el material granular que almacenan los silos, difícilmente obedece una ley de movimiento sencilla, como la de un líquido irrotacional, incompresible y sin viscosidad como es el agua en un tanque.

De los estudios que se han efectuado en tanques, se puede deducir una primera aproximación para estimar las presiones horizontales sobre las paredes de los silos.

En los tanques la presión hidrodinámica ejercida sobre las paredes se puede obtener suponiendo tres componentes de presión (ref. 7 y ref. 13).

$$P_1 + P_2 + P_3$$

donde  $P_1$  es la componente de baja frecuencia originada por oleaje del fluido generado en tanque y suponiendo a éste rígido (presión convectiva).

$P_2$  es la componente impulsiva que el fluido ocasiona cuando se mueve con la frecuencia del tanque.

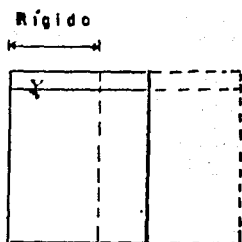
$P_3$  es la componente de alta frecuencia originada por las vibraciones de las paredes del tanque. Las tres componentes de presión se muestran esquemáticamente en la figura 5.1.

La presión convectiva en tanques cilíndricos ha recibido considerable atención y muchos experimentos y estudios teóricos, se han publicado en la literatura. En estos estudios se ha asumido la hipótesis de tanques infinitamente rígidos. Esta hipótesis es válida en ocasiones en la práctica, ya que las formas modales del oleaje del fluido tienen mucho mayor frecuencia, que las formas modales de flexión del cascarón del cilindro.

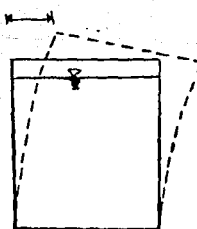
A la presión  $P_2$  también conocida como presión rígido-impulsiva, es también vista subjetivamente por un gran número de investigaciones y dan formulaciones para su evaluación.

Por otro lado, la presión  $P_3$  llamada presión flexible-impulsiva, es función de la aceleración modal del tanque. Esto es un gran problema que requiere del conocimiento de las propiedades dinámicas del sistema tanque-fluido, y es necesario estudiarlo para determinar dichas propiedades.

## MOVIMIENTO

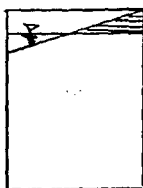


## Flexible

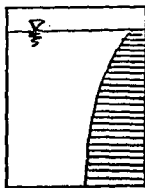


## PRESIÓN

## Convectiva



## Rígido—Impulsiva



## Flexible—Impulsiva



FIG. 5.1 MOVIMIENTO DE TANQUES Y PRESIONES  
HIDRODINÁMICAS RESULTANTES

En los silos se tiene una situación ligeramente distinta. El grano no tiene oleaje y las paredes se pueden suponer rígidas. Esta última hipótesis puede ser discutida, pero sirve para facilitar los cálculos de las presiones en cuestión.

Si se aceptan las hipótesis anteriores, se puede decir que las presiones (por sismo) será igual a las de componente impulsiva.

En la figura 5.2 se muestra un elemento diferencial del silo moviéndose con una aceleración  $\ddot{x}_t$ ; este elemento contiene material granular con un peso específico  $\gamma$ .



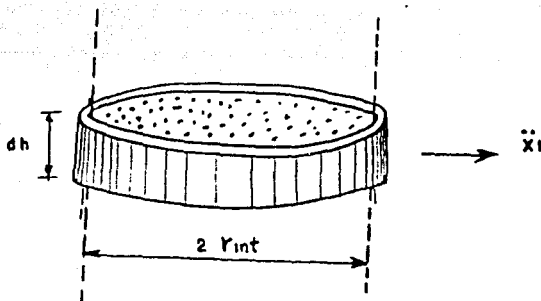


FIG. 5.2 EL ELEMENTO DIFERENCIAL DE SILO

Si se obtiene el peso de ese elemento diferencial, se tiene :

$$W = \pi \cdot (r_{int})^2 \cdot dh \cdot \gamma$$

y su correspondiente masa :

$$m = \frac{W}{g} = \frac{\pi \cdot (r_{int})^2 \cdot dh \cdot \gamma}{g}$$

por lo que la fuerza de inercia,  $F_z$ , ejercida a dicha masa es :

$$F_z = m \ddot{x}_t = \pi (r_{int})^2 \frac{\gamma \cdot \ddot{x}_t \cdot dh}{g}$$

El diagrama de cuerpo libre de este anillo se muestra en la figura 5.3 donde  $P_s(\theta)$  es la función que define las presiones debidas al sismo, la cual en términos generales, dependerá del ángulo  $\theta$ ;  $\mu$  que es un coeficiente de fricción del material y  $P_v$  es la presión vertical del grano a la profundidad  $h$  (altura  $z$ ).

La forma de variación (con respecto al ángulo  $\theta$ ) de las presiones debidas al sismo, no es conocida exactamente. Por lo que se supone dos distribuciones de presiones :

a) El valor de  $P_s$  es constante con el ángulo  $\theta$  (fig. 5.4)

b) El valor de  $P_s$  varía senoidalmente (fig. 5.5) teniendo un valor máximo en  $\theta=0$  y un valor nulo en  $\theta=90$

La deducción de las fórmulas para determinar los valores de las presiones debidas a sismo, se desarrolla con detalle en la referencia  $\theta$ , para cada una de las dos distribuciones de presión supuesta.

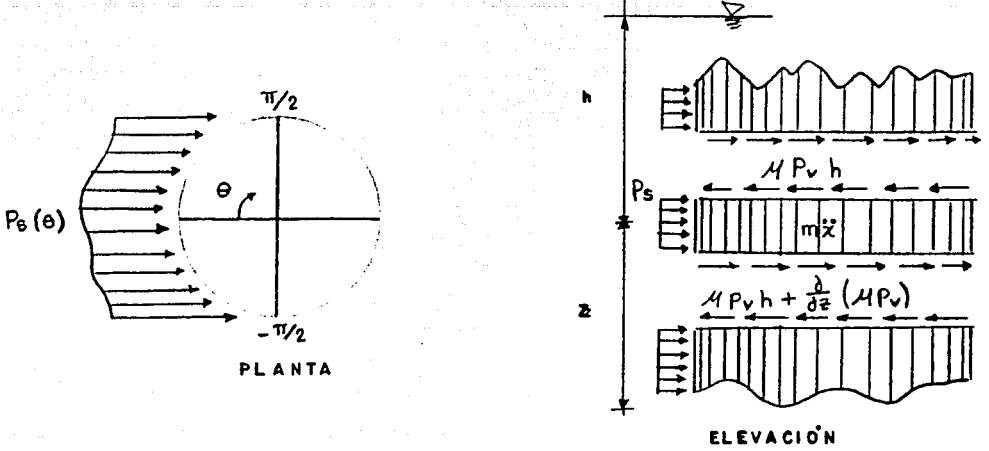


FIG. 5.3 DIAGRAMA DE CUERPO LIBRE

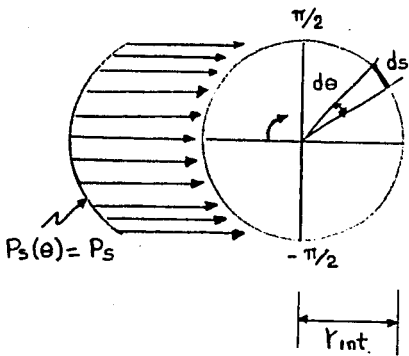


FIG. 5.4 DISTRIBUCIÓN DE PRESIONES CONSTANTE

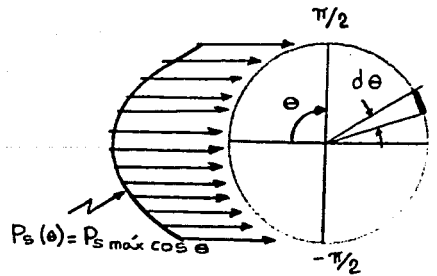


FIG. 5.5 DISTRIBUCIÓN DE PRESIONES SENOIDAL

Por lo que se tiene :

$$a) \quad P_s = \gamma \cdot r_{int} \left[ \frac{\ddot{x}_t}{g} - M e^{-Bh} \right]$$

donde

$\gamma$	Peso específico del material almacenado
$r_{int}$	radio interno del cilindro
$\ddot{x}_t$	Aceleración del elemento diferencial
$g$	Aceleración de la gravedad
$M$	Coefficiente de fricción del material
$h$	Profundidad del punto de análisis

$$B = \frac{K M'}{(A/L)}$$

$$K = \frac{1 - \text{sen } \phi}{1 + \text{sen } \phi}$$

$\phi$	Ángulo de fricción interna del material
$M'$	Coefficiente de fricción entre el silo y el material
$A$	Área interior del silo
$L$	Perímetro interior del silo

b)

$$P_{s,max} = \frac{\pi}{2} \gamma r_{int} \left[ \frac{\ddot{x}_t}{g} - M e^{-Bh} \right]$$

Así con estas dos expresiones anteriores se puede evaluar en forma aproximada, las presiones debidas al sismo, para diferentes distribuciones de presiones consideradas.

Se han podido desarrollar ya métodos para poder determinar las características dinámicas de vibración en silos.

En la referencia 6 se describen 3 métodos que a continuación se mencionan :

a) El método comúnmente conocido como estático, donde se parte de suponer que las fuerzas sísmicas equivalentes actúan por unidad de longitud en todo lo alto del silo.

Estas fuerzas son iguales a la masa (también por unidad de longitud) multiplicada por un coeficiente proporcionan a la altura, donde se desea evaluar la intensidad de la fuerza sísmica. El factor de proporcionalidad se considera como la relación de cortante en la base (Vb) entre el peso del silo (W) y que sea igual a un cociente C/Q, siendo C un coeficiente sísmico y Q el coeficiente de ductilidad aplicable.

De la figura 5.6 se puede comprobar que la aceleración máxima (Amáx) es :

$$A_{máx} = 2g \frac{C}{Q}$$

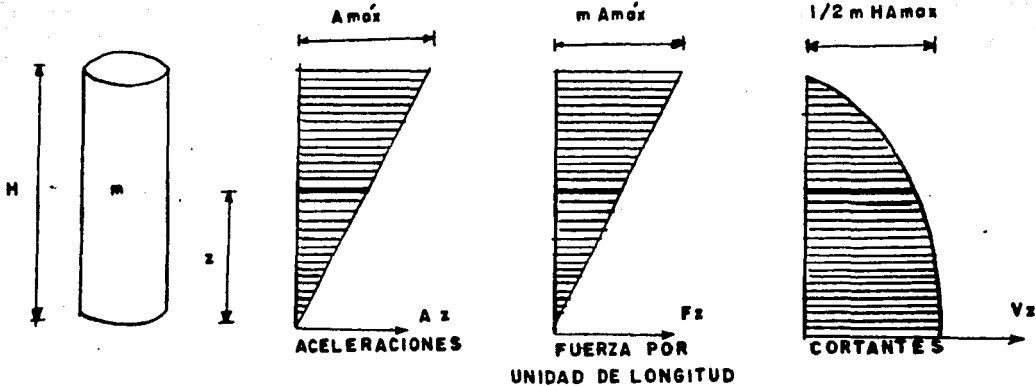
y que el cortante a una altura z está dado por :

$$V_z = \frac{mg}{H} (C/Q) (H^2 - z^2)$$

Así mismo se obtiene el momento flexionante que actúa a la altura z

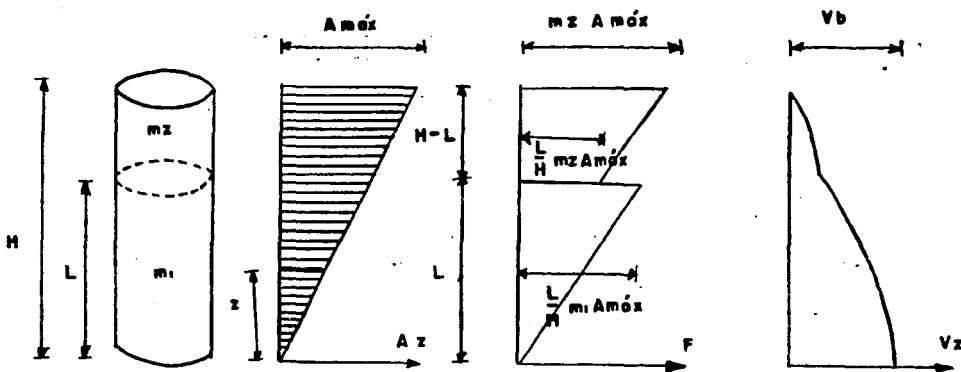
$$M_z = 2mg(C/Q) \frac{1}{H} \left[ \frac{H^3}{3} - z \frac{H^2}{2} + \frac{z^3}{6} \right]$$

La aplicación de este método a silos parcialmente llenos también puede ser posible y el criterio a seguir es el mismo (ver fig. 5.7).



$$\frac{V}{W} = \frac{1/2 m H A_{\max}}{m g H} = \frac{c}{Q} \Rightarrow A_{\max} = 2g (c/Q)$$

FIG. 5.6 OBTENCIÓN DE LA ACELERACIÓN MÁXIMA CON EL MÉTODO ESTÁTICO



$$\frac{V}{W} = \frac{1/2 A_{\max} \left\{ \left[ m_2 + \frac{L}{H} m_1 \right] (H-L) + \frac{L^2}{H} m_1 \right\}}{\left[ m_1 L + m_2 (H-L) \right] g} = \frac{c}{Q}$$

$$A_{\max} = 2g (c/Q) \frac{\left[ m_1 L + m_2 (H-L) \right]}{\left[ m_2 + \frac{L}{H} m_1 \right] (H-L) + \frac{L^2}{H} m_1}$$

FIG. 5.7 ACELERACIÓN MÁXIMA PARA UN SILO PARCIALMENTE LLENO

**b) Método modal de masas concentradas.**

El método modal (ref.12) se puede aplicar al análisis de silos (y baterías de silos) si la viga en voladizo que idealiza a estas estructuras se divide en varios segmentos y las masas de cada uno de estos se concentran en sus centroides, como se muestra en la fig. 5.8 .

Dadas las características de la geometría, resulta indispensable considerar las deformaciones por flexión y por cortante para la evaluación de las características modales; tomando en cuenta para ello, solamente las deformaciones laterales de la estructura. Para la determinación de estas características, se puede emplear dos métodos comunes :

1. Valuar la matriz de rigideces de la viga utilizando el método de flexibilidades y resolver el problema de valores y vectores característicos, una vez que la matriz de masas también se haya evaluado; y

2. Valuar directamente las frecuencias y formas modales empleando el método iterativo de Stodola-Vianello-Newmark.

Como se sabe, este método modal puede emplearse para conocer la respuesta de la estructura en distintos intervalos de tiempo, si se conoce el registro de un sismo, pero, para fines prácticos un análisis modal espectral, generalmente es suficiente para obtener las respuestas máximas.

De estos análisis se puede obtener desplazamientos, velocidades y aceleraciones de cada una de las masas, así como cortantes y momentos de volteo a distintas alturas de la estructura.

Este método permite analizar silos y baterías de silos llenos y parcialmente llenos. También se pueden considerar secciones transversales que varíen con la altura y más aún, se puede extender su aplicación al análisis de silos con torre de maquinaria.

El efecto del suelo en estas estructuras también puede ser tomado en cuenta, en forma aproximada, agregando tres grados de libertad (desplazamiento vertical, desplazamiento horizontal y giro) a la base del silo, como se muestra en la figura 5.9 .

**c) Método modal, masa distribuida.**

En este método se efectúa un análisis modal normal partiendo de conocer las frecuencias y formas modales, en donde se toma en cuenta para dicho análisis las deformaciones por cortante e inercia rotacional. En las referencia B se desarrolla este método con gran detalle.

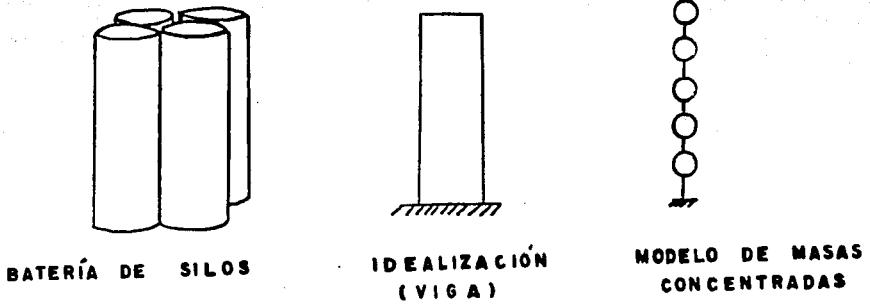


FIG. 5.8 MODELO DE MASAS CONCENTRADAS

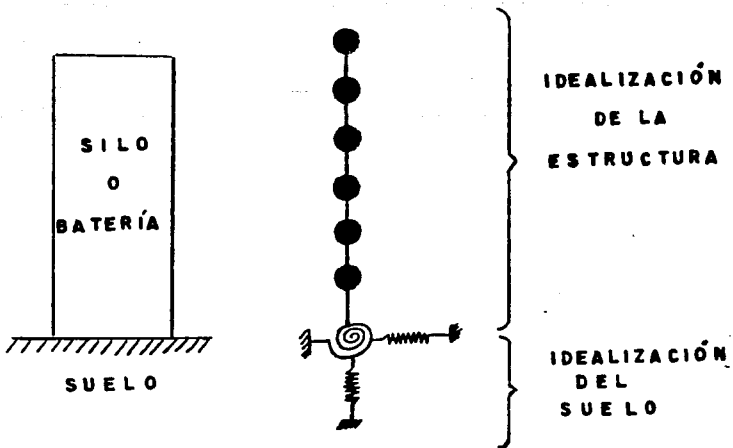


FIG. 5.9 IDEALIZACIÓN APROXIMADA PARA TOMAR EN CUENTA EL EFECTO DEL SUELO

## d) Otros métodos.

Al igual que los estudios de tanques (ref. 9) el método del elemento finito puede servir para calcular la respuesta sísmica de silos. Este método podría emplearse para determinar la interacción entre el grano y las paredes del silo, y así evaluar en forma más precisa las presiones causadas por el sismo y su distribución en la altura. También se podría utilizar para mostrar la influencia de la flexibilidad de las paredes del silo.

El principal problema de este planteamiento lo constituye la gran variedad del comportamiento del material que almacena, el cual difícilmente sigue una ley de movimiento sencilla. Por lo anterior la posibilidad de hacer un análisis por este método, tomando en cuenta la flexibilidad de la sección transversal y la influencia del material, aún es lejano, y seguramente requerirá de mucho estudio analítico y experimental.

Finalmente se describe otro método, que más adelante se comprueba ser el más adecuado para evaluar las características dinámicas de un silo, el de matriz de transferencia (ref. 24).

El método consiste en aplicar la dinámica estructural a cuerpos en movimiento.

Para definir este método describimos los siguientes términos en base a la figura 5.10 .

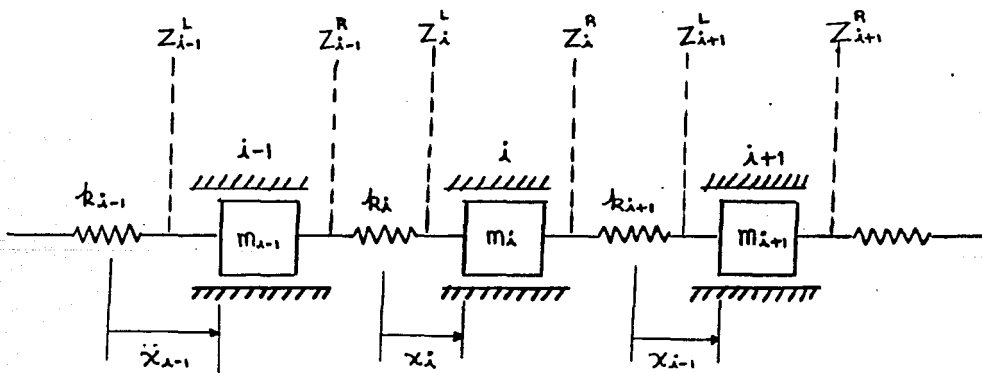


FIG. 5.10

SISTEMA MASA-RESORTE



- Vector estático ( $Z_i$ ) de un punto  $i$  en un sistema elástico, está compuesto por el desplazamiento del punto  $i$  ( $X_i$ ) y su correspondiente fuerza interna ( $N_i$ ). En notación matricial se puede escribir como

$$Z_i = \begin{bmatrix} X_i \\ N_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X \\ N \end{bmatrix}_i$$

- Matriz de transferencia del sistema de masas en movimiento. Considerando el sistema presentado en la figura 5.10, el cual tiene una frecuencia circular  $\omega$ . La masa  $m_{i-1}$  y la masa  $m_i$  están conectadas entre sí por un resorte de rigidez  $K_i$ . El vector estático a la izquierda de la masa  $m_i$  se denota por  $Z_i^R$  y el vector estático a la derecha de la masa  $m_i$  se denota por  $Z_i^L$ . Si se aísla el resorte  $K_i$  y usamos una convención de signos de fuerza se tiene el diagrama que se presenta en la figura 5.11.

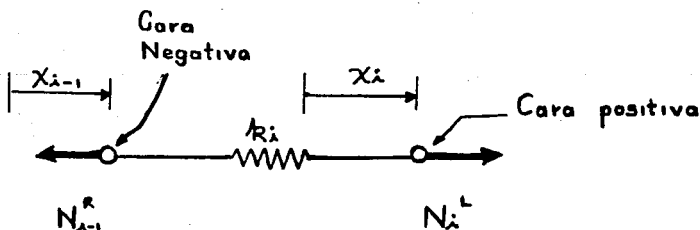


FIG. 5.11 DIAGRAMA DE CUERPO LIBRE DEL RESORTE  $K_i$

Para obtener el equilibrio se necesita que :

$$N_{A-1}^R = N_A^L$$

y por las propiedades de rigidez del resorte se tiene :

$$N_A^L = N_{A-1}^R = k_i (x_i - x_{i-1})$$

escribiendo la ecuación en la siguiente forma se tiene :

$$x_i = x_{i-1} + \frac{N_{i-1}^R}{k_i} \quad N_i^L = (0)x_{i-1} + N_{i-1}^R$$

expresando lo anterior en forma matricial se tiene :

$$\begin{bmatrix} x \\ N \end{bmatrix}_i^L = \begin{bmatrix} 1 & \frac{1}{k_i} \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x \\ N \end{bmatrix}_{i-1}^R$$

$$Z_i^L = F_i Z_{i-1}^R$$

en donde  $F_i$  se conoce como la matriz de campo de transferencia.

La relación entre el vector estático a la derecha e izquierda de  $M_i$  se puede considerar actuando con las fuerzas en la masa  $i$  (fig. 5.12).

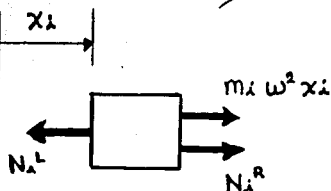


FIG.5.12 DIAGRAMA DE CUERPO LIBRE DE LA MASA  $i$

Las dos fuerzas  $N_i^R$  y  $N_i^L$  sumadas a la fuerza de inercia actúan en una dirección. Del equilibrio de fuerzas se tiene:

$$N_i^R = N_i^L - m_i \omega^2 x_i$$

y escribiendo en notación matricial se tiene

$$\begin{bmatrix} x \\ N \end{bmatrix}_i^R = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -m_i \omega^2 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ N \end{bmatrix}_i^L$$

$$Z_i^R = P_i Z_i^L$$

donde  $P_i$  se conoce como punto de la matriz.

Definidos los términos anteriores se puede seguir el siguiente razonamiento para calcular la vibración de flexión en una viga con una masa distribuida, por medio del empleo de la matriz de transferencia (fig. 5.13):

- Se aísla un elemento entre el punto  $i-1$  y  $i$ ; fig. 5.14.
- Se tienen los desplazamientos de flexión  $w$  y de giro  $\psi$  correspondientes a las fuerzas cortante  $V$  y el momento  $M$  actuando en la viga (fig. 5.15)
- El equilibrio de fuerzas se obtiene como

$$V_i^L - V_{i-1}^R = 0$$

$$M_i^L - M_{i-1}^R - V_i^L \lambda_i = 0$$

- Considerando la viga en cantiliver de la fig. 5.16 se obtienen las ecuaciones para calcular  $\psi$  y  $w$  mediante la aplicación del concepto de rigidez a la flexión  $EJ$

$$w = -\frac{M\lambda^2}{2EJ} + \frac{V\lambda^3}{3EJ}$$

$$\psi = \frac{M\lambda}{EJ} - \frac{V\lambda^2}{2EJ}$$

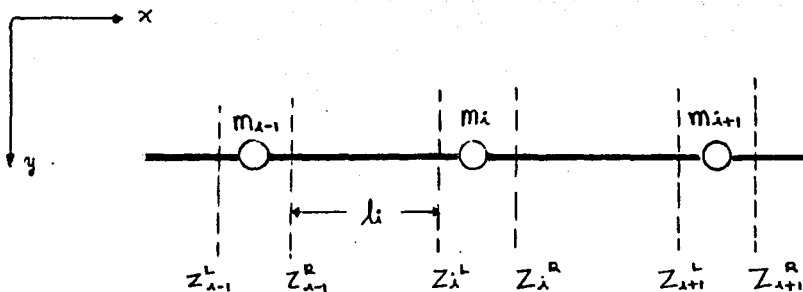


FIG. 5.13 VIGA CON MASAS CONCENTRADAS

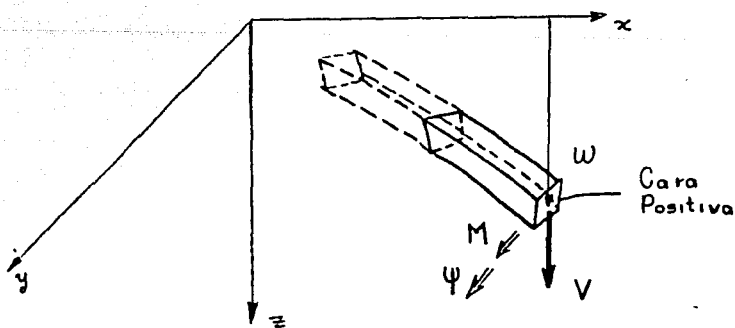


FIG. 5.14 CONVENCION DE SIGNOS PARA LA VIGA

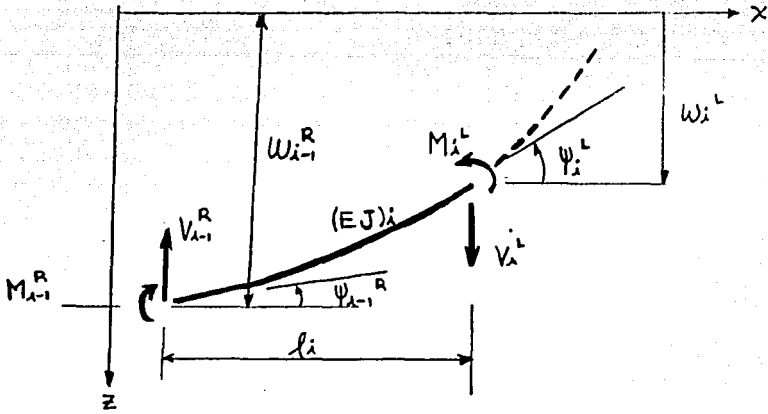


FIG. 5.15 FUERZAS EN LOS EXTREMOS Y FLEXIÓN PARA LAS MASAS DE LA VIGA

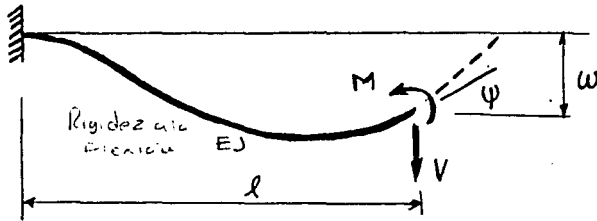


FIG. 5.16 CANTILIVER SUJETO A LA FUERZA V y MOMENTO M

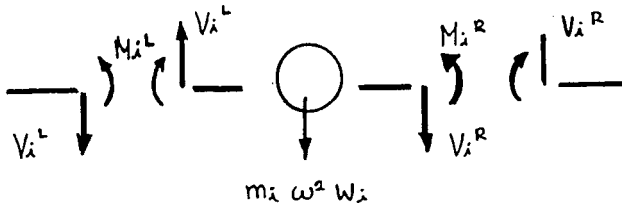


FIG. 5.17 DIAGRAMA DE CUERPO LIBRE DE LA MASA i

- Aplicando los resultados anteriores al problema y mediante los conceptos definidos, se puede escribir en forma matricial como:

$$\begin{bmatrix} -W \\ \psi \\ M \\ V \end{bmatrix}_i^L = \begin{bmatrix} 1 & l & \frac{l^2}{2EJ} & \frac{l^3}{6EJ} \\ 0 & 1 & \frac{l}{EJ} & \frac{l^2}{2EJ} \\ 0 & 0 & 1 & l \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -W \\ \psi \\ M \\ V \end{bmatrix}_{i-1}^R$$

$$Z_i^L = F_i Z_{i-1}^R$$

Así mismo, al introducir la fuerza de inercia como se muestra en el diagrama de cuerpo libre de la masa  $i$  en la figura 5.17, se tiene, planteando el equilibrio:

$$V_i^R = V_i^L - m_i \omega^2 W_i$$

en notación matricial

$$\begin{bmatrix} -W \\ \psi \\ M \\ V \end{bmatrix}_i^R = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ m\omega^2 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -W \\ \psi \\ M \\ V \end{bmatrix}_i^L$$

Es lo anterior en forma simplificada como se determina el valor de la frecuencia de un sistema empleando el método de la matriz de transferencia.

# V I . - ESTUDIOS EXPERIMENTALES EN MODELOS

De los estudios experimentales que se han desarrollado en modelos, son pocos de los que se tiene conocimiento.

En el presente capítulo describiremos algunos estudios que se han desarrollado para poder analizar el comportamiento dinámico de un silo ante la acción de un sismo.

Una de las pruebas que se han realizado son las desarrolladas por Shimamoto y Kodama (ref. 11).

Los autores llevarón a cabo pruebas de vibración en modelos de silos a pequeña escala empotrados en una mesa vibratoria con el propósito de evaluar la respuesta sísmica de silos que almacenan granos.

Para poder simular en un modelo de pequeña escala al silo real, los autores tuvieron un cuidado especial en la teoría de similitud y semejanza.

Las pruebas se realizarón con 4 modelos de silos cilindricos (3 de ellos construidos de PVC y el otro silo se construyó de acero), los cuales fueron llenados con carbón y empotrados en una mesa vibratoria. Las dimensiones de cada modelo son presentadas en la tabla 6-I

tabla 6-I

modelo	D (cm)	h (cm)	t ( mm)
PVC I	150	160	5
PVC II	85	90	2
PVC III	85	90	4
Acero	150	160	0.8

- De la tabla anterior se tiene :
- D Diámetro interior del cilindro
  - h Altura del cilindro
  - t Espesor de las paredes del cilindro

Cada modelo de silo intenta reproducir a un silo prototipo de 38 m. de diámetro y 40 m. de altura.

La mesa vibratoria fué excitada de dos formas diferentes :

- a) Onda de forma senoidal con una amplitud de aceleración de 10 a 200 gals y con frecuencia de 5 a 45 Hz
- b) Onda que simula la magnitud de un terremoto de alta amplitud de aceleración de 200-300 gals.

Para poder medir la respuesta de aceleración del material almacenado se instalarón 3 acelerómetros (AC1, AC2 y AC3) colocados a diferentes alturas del silo a lo largo del eje centroidal del cilindro, como se muestra en la figura 6.1.



La respuesta de aceleración de las paredes del cilindro se registraron con 7 acelerómetros (AS1, AS2, AS3, ..., AS7) colocados en la parte superior del cilindro, mostrados en la fig. 6.1.

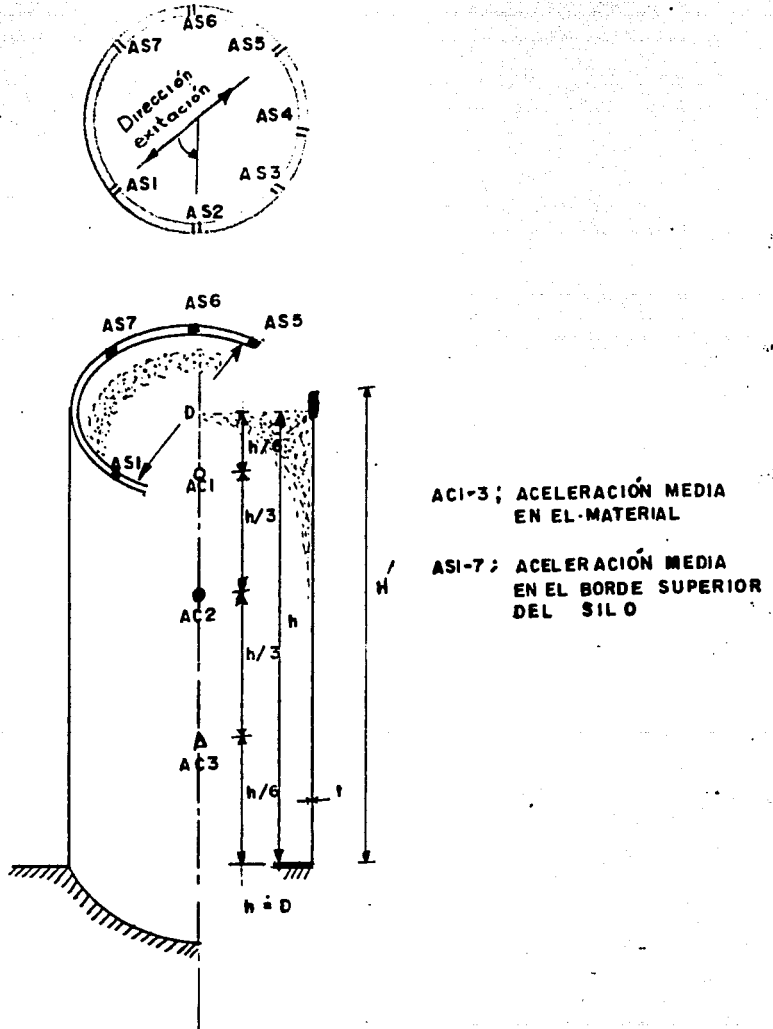


FIG. 6.1 FORMA DEL MODELO DEL SILO Y COLOCACIÓN DE LOS ACELERÓMETROS

Los datos que se tienen de las pruebas al igual que los resultados de la misma son analizados por una serie de fórmulas.

En la fig. 6.2 se muestra un esquema general de la prueba señalando la forma en que se registran y analizan los datos y resultados en el transcurso de todas las pruebas.

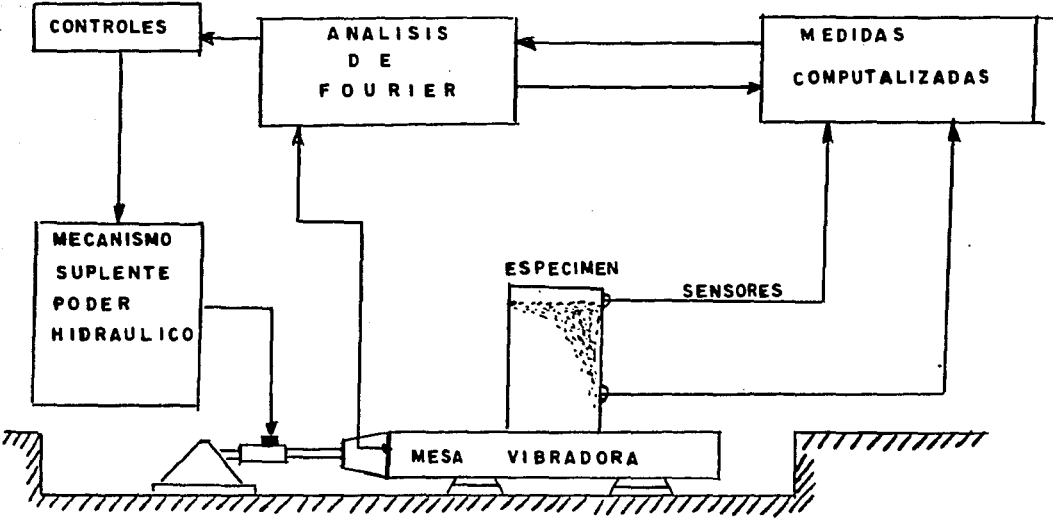


FIG. 6.2 SISTEMA DE MEDICIÓN Y ANÁLISIS

Los resultados que se obtuvieron de las pruebas son de dos tipos, dependiendo la forma de excitar la mesa vibratoria:

- a) Pruebas con ondas senoidales.

En la fig. 6.3 se presentan las curvas típicas de resonancia que se registrarán para un primer modelo de PVC I, en donde la amplitud de aceleración de la mesa se mantuvo constante =30 gals. Se tienen registrados los valores de la aceleración amplificada; en la gráfica se muestra la relación de amplitud de aceleración y la amplitud de aceleración de la excitación.

En dicha gráfica se aprecia como el acelerómetro AC1 (colocado en el eje central del cilindro en su parte superior, que registra aceleraciones del material almacenado), es el que mayor respuesta de aceleración registra, y en donde también se observa que los demás acelerómetros registran amplitudes de aceleración menores que las del acelerómetro AC1, pero siguiendo un mismo comportamiento, en cuanto a la variación de dicha amplitud.

Para poder observar como es el comportamiento dinámico del contenido del cilindro se obtuvieron las gráficas presentadas en las fig. 6.4a y 6.4b, correspondientes al modelo de FVC II y de acero respectivamente, en donde las diferentes curvas que se obtienen corresponden a diferentes amplitudes de aceleración de la mesa vibratoria.

En dichas figuras es notable para los dos casos, el decremento que se tiene en la respuesta del acelerómetro AC1, al aumentar progresivamente la amplitud de la aceleración de la mesa vibratoria.

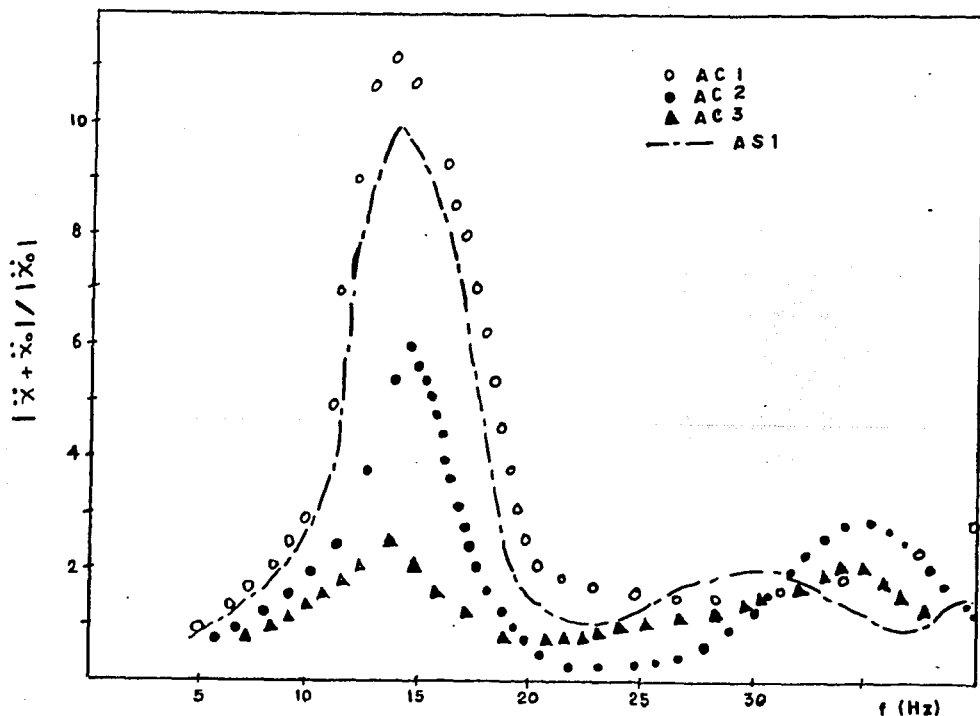


FIG. 6.3 RELACIÓN ENTRE AMPLITUD DE ACCELERACIÓN  
Y FRECUENCIA

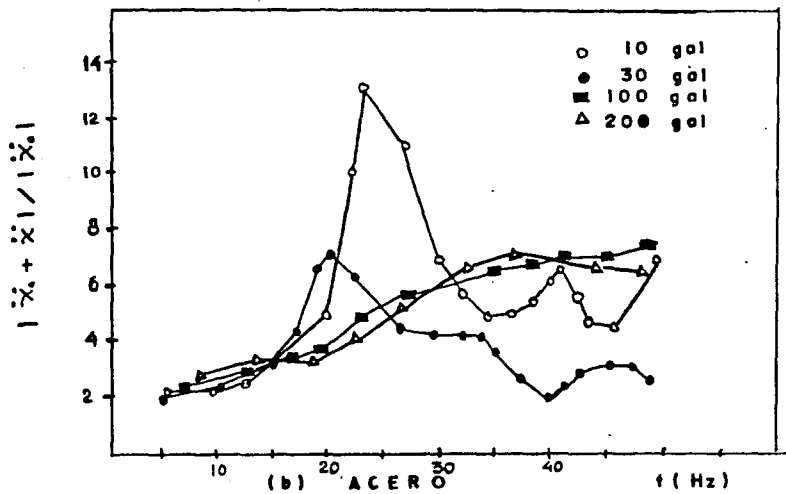
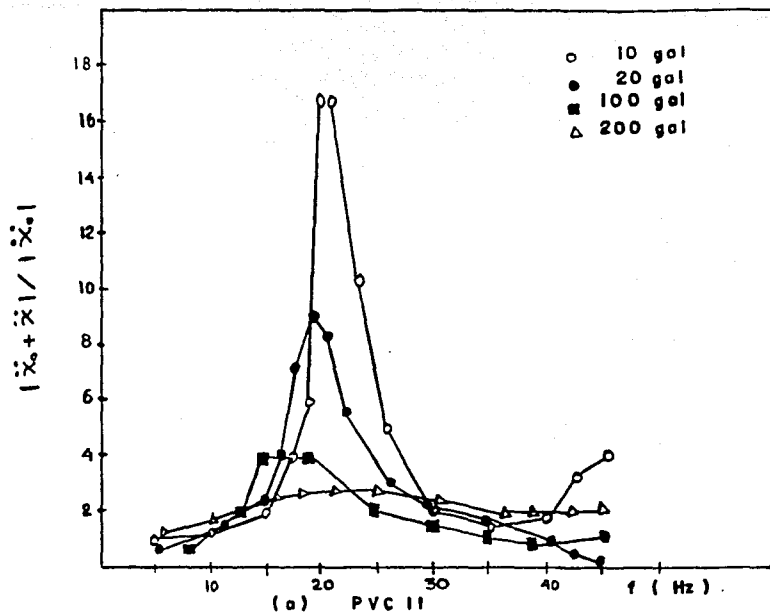


FIG. 6.4 CURVAS DE RESONANCIA  
(ACELERÓMETRO-ACI)

En lo referente al comportamiento dinámico del cilindro, en las figuras 6.5 y 6.6 se presentan las curvas de amplitud de aceleración observadas en la parte superior del cilindro, correspondiente a una amplitud de aceleración de 30 y 100 gals respectivamente.

El comportamiento observado indica que la aceleración inducida al modelo en su parte superior sigue un arreglo de curvas de amplitud de aceleración compuestas de :

- i) Una amplitud de aceleración de forma semejante a la frecuencia de excitación de la mesa vibratoria (referido a las fig. 6.5a y 6.5b)
  - ii) Una amplitud de aceleración de dos veces la frecuencia de excitación de la mesa vibratoria. Esto último se confirmó, ya que se analizaron dichas curvas por un análisis de Fourier.
- Este fenómeno observado es conocido como la frecuencia de excitación aprovechable en la primera frecuencia de resonancia.

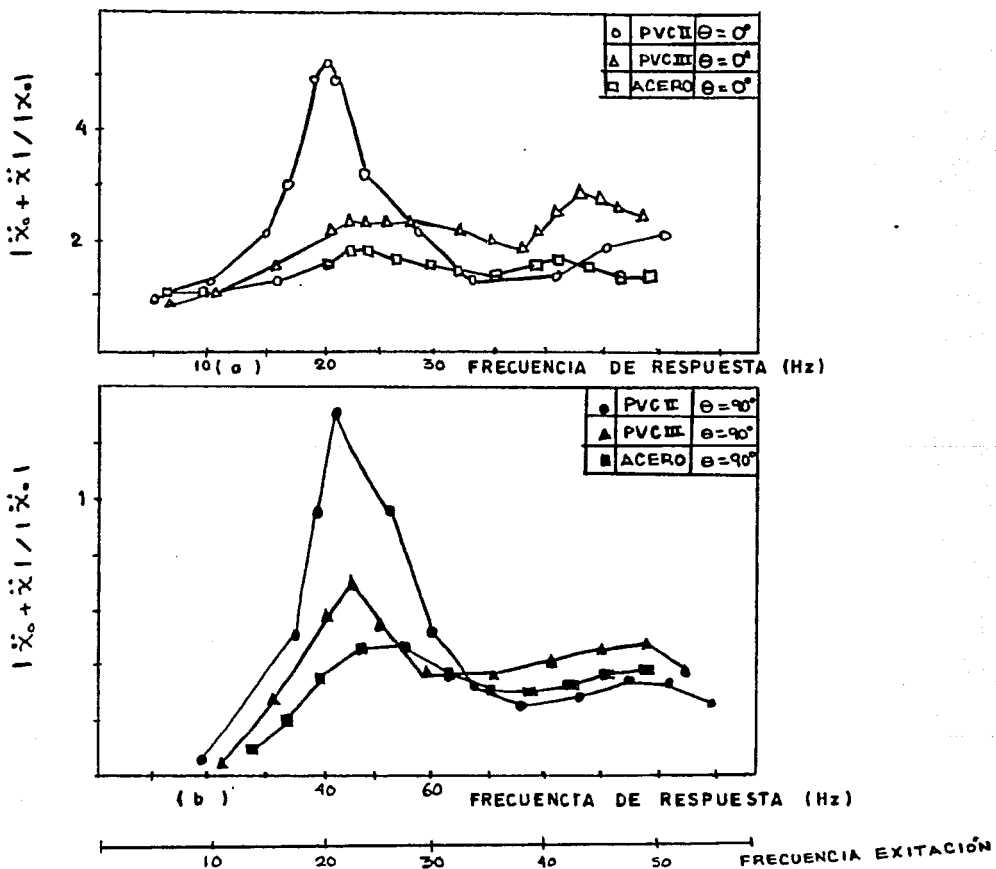


FIG. 6.5 CURVAS DE RESONANCIA CON  $|\ddot{x}_0| = 30 \text{ gal}$

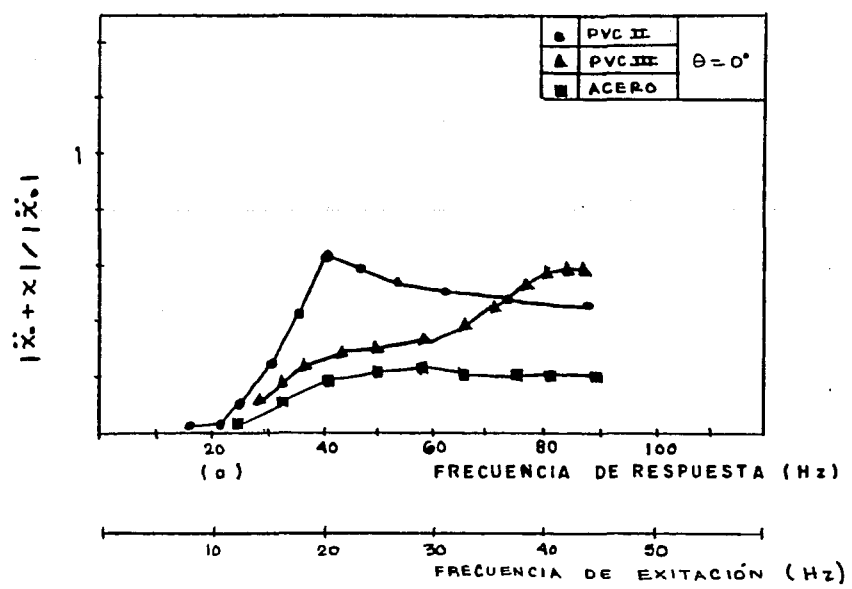
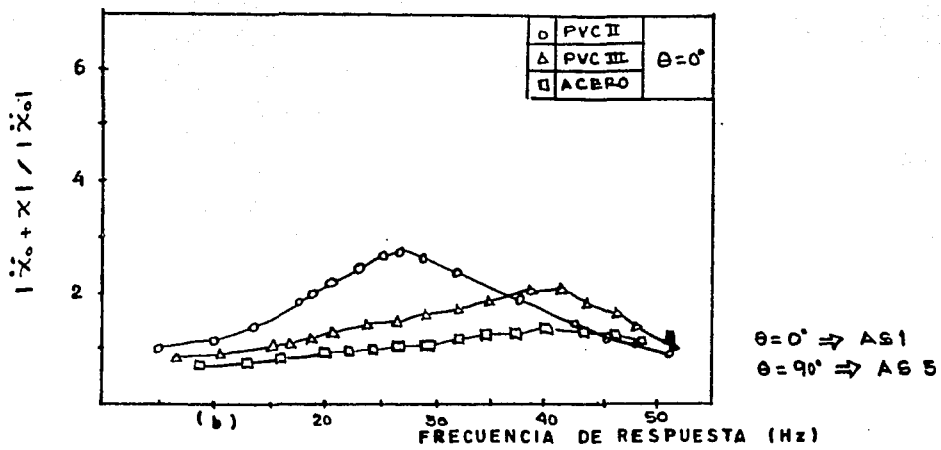


FIG. 6.6 CURVAS DE RESONANCIA CON  $|x_0| = 100$  gal

La figura 6.7 presenta la forma de amplitud de aceleración radial en el borde superior de la prueba del silo de PVC II.

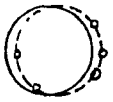


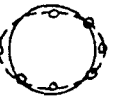
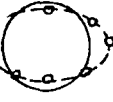
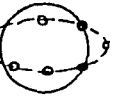
Excit. Resp.	$ \ddot{x}_0  = 10 \text{ gal}$ $f_0 = 20.5 \text{ Hz}$	$ \ddot{x}_0  = 30 \text{ gal}$ $f_0 = 19.1 \text{ Hz}$	$ \ddot{x}_0  = 100 \text{ gal}$ $f_0 = 19.1 \text{ Hz}$
$f_0$ — (gal)			
$2 f_0$ — (gal)			

FIG. 6.7 MODOS CIRCUNFERENCIALES DE ACCELERACIÓN  
EN LA PARTE SUPERIOR DEL SILO  
(PVC II)

b) Pruebas con ondas sísmicas.

El registro de la respuesta de aceleración para el modelo PVC II, es presentado en la figura 6.8, en donde en la misma figura se presenta la variación de la aceleración de la mesa vibratoria.

En dicha figura se comprueba lo observado en las pruebas con ondas senoidales, en donde las máximas respuestas de aceleración se obtienen en el acelerómetro AC1.

También como se realizó con las pruebas con ondas senoidales, las pruebas con ondas sísmicas son analizadas por una serie de Fourier.

El análisis de Fourier presenta a los acelerómetros AS1 y AS5 (Acelerómetros colocados en la parte superior del cilindro con valores de  $\theta=0^\circ$  y  $\theta=180^\circ$  respectivamente) y el ACI (colocado en el material que almacena el cilindro), que tienen una frecuencia cercana a la primera frecuencia de resonancia registrada en el sistema, pero los acelerómetros AS3 y AS7 (colocados en la parte superior del cilindro con valores de  $\theta=90^\circ$  y  $\theta=270^\circ$  respectivamente) se obtiene una frecuencia cercana al doble de la primera frecuencia de resonancia registrada en el sistema (similar a lo observado en las pruebas de ondas senoidales).

En la figura 6.9 se presenta la relación de la máxima aceleración en varios puntos en el borde superior del modelo y de la aceleración de la mesa vibratoria.

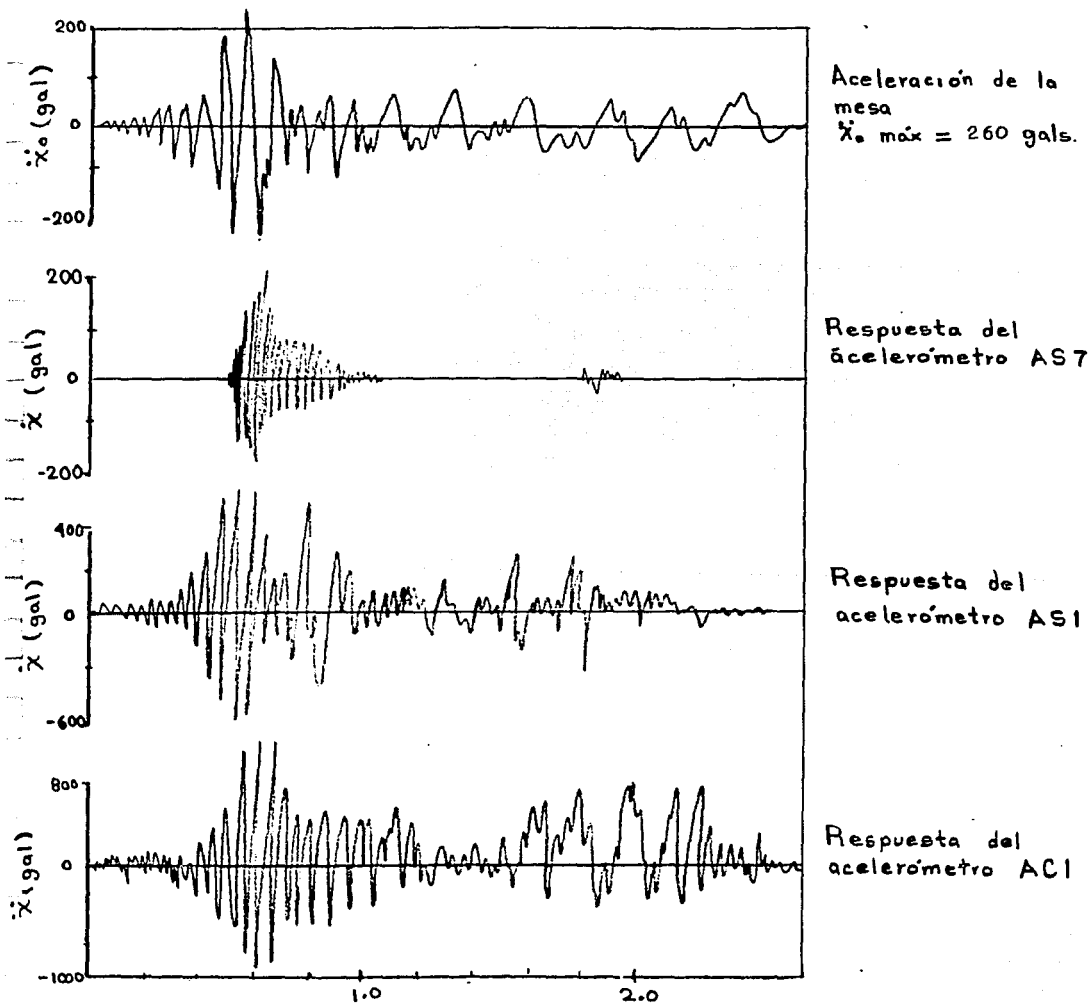


FIG. 6.8 TÍPICOS REGISTROS DE RESPUESTA (MODELO PVC II, SISMO HACHINOE 1968)



En la figura 6.10 se presenta la relación que existe entre la máxima aceleración registrada en varios puntos del eje centroidal del material almacenado y las aceleraciones de la mesa vibratoria.

El análisis numérico realizado por los autores utilizan el método del elemento finito en donde la pared del silo es simulado como un cilindro cónico y el contenido del cilindro como un elemento sólido.

El análisis que se obtiene al analizar el modelo de PVC I con una excitación de 30 gals. se observa que existe buena relación entre los resultados analíticos y experimentales, esta comparación se puede observar perfectamente en la fig. 6.11.

Para cuando se analizó el modelo con una amplitud de aceleración de 100 gals. los resultados obtenidos difieren un poco, según se presenta en la fig. 6.12.

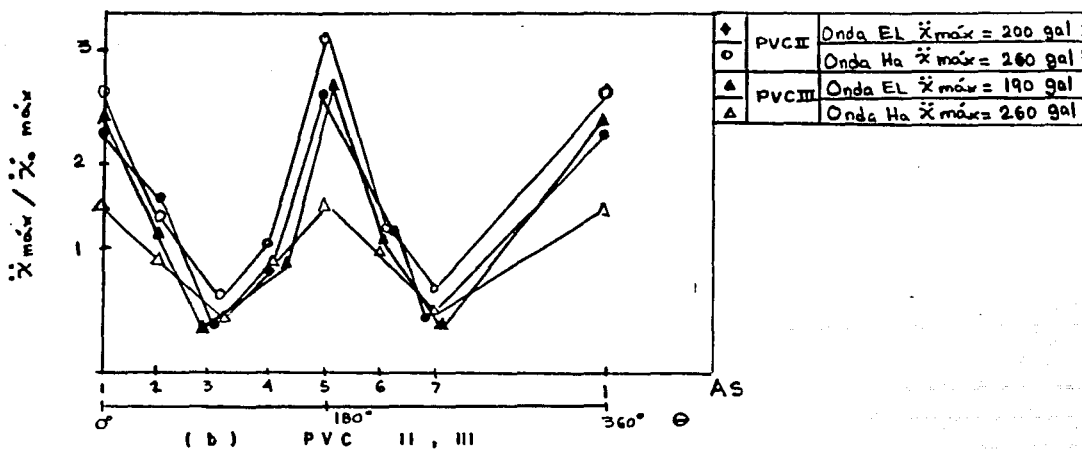
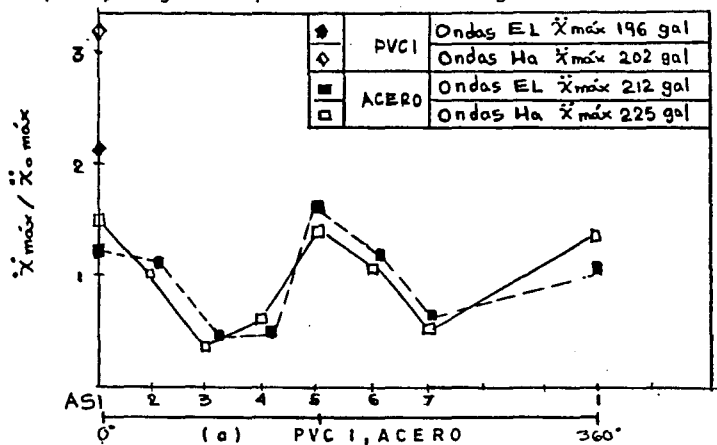


FIG. 6.9 RELACION DE MÁXIMA RESPUESTA DE ACCELERACIÓN Y LA MÁXIMA ACCELERACIÓN DE LA MESA

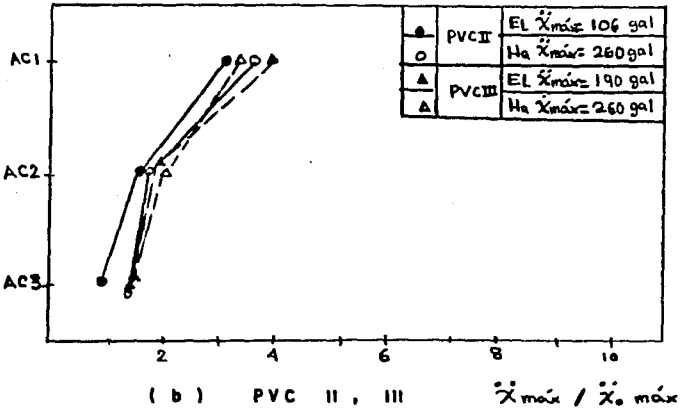
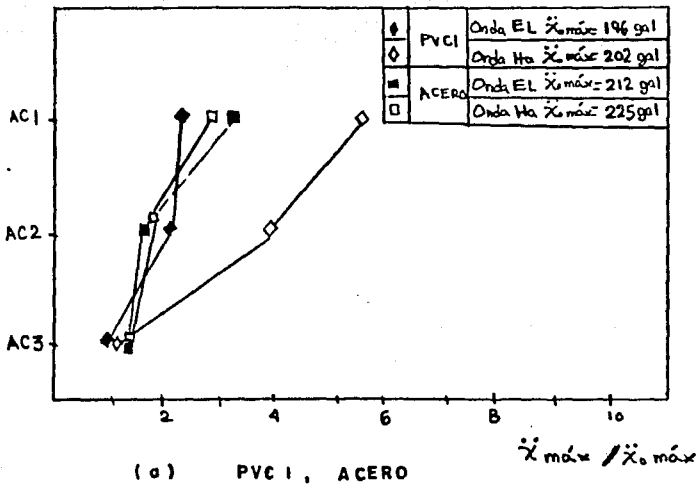


FIG. 6.10 RELACIÓN DE MÁXIMA RESPUESTA DE ACELERACIÓN Y MÁXIMA ACELERACIÓN DE LA MESA

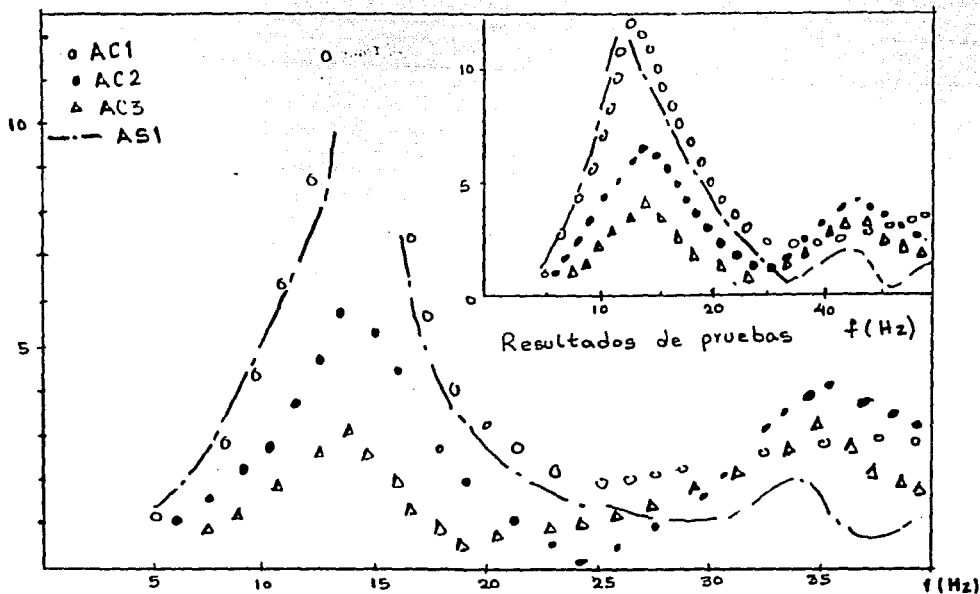


FIG. 6.11 RESPUESTA DE FRECUENCIA ( MODELO PVC 1 ,  $1X_0 = 30$  gal )

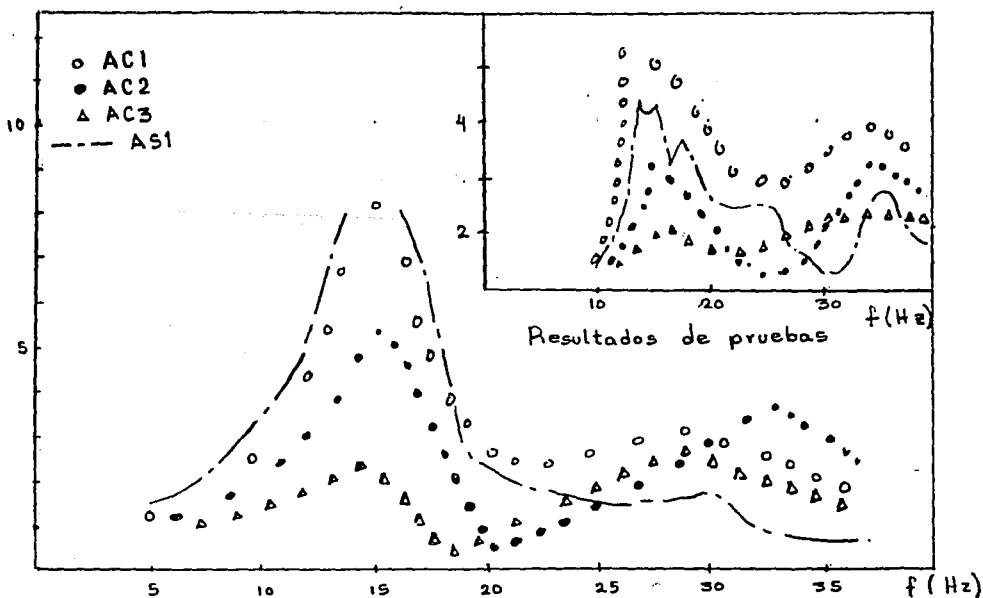


FIG. 6.12 RESPUESTA DE FRECUENCIA ( MODELO PVC 1 ,  $1X_0 = 100$  gal )

Las conclusiones principales a las que llegaron los autores son :

- Con el incremento de la excitación de la mesa, el pico de la curva de amplificación de respuesta del material almacenado decrece y el decremento del valor del pico se desplaza en dirección de la frecuencia inferior, esto también se puede interpretar por el análisis numérico, en términos del módulo de cortante y la relación de amortiguamiento del material, expresado como función de su deformación

- Los silos y el material almacenado vibran con frecuencias de resonancia similares en el primer modo, pero la segunda frecuencia de resonancia del material solamente vibra en la forma modal

- En las primeras frecuencias de resonancia la tendencia del borde superior a sufrir una deformación elíptica inducida por la componente de aceleración de las dos frecuencias de resonancia. El origen de las componentes de aceleración, probablemente puede ser atribuido a la presencia del contenido del cilindro

- Para una excitación de amplitud de aceleración de orden elevado (semejante al de la aceleración sísmica) la máxima respuesta ocurre en la primera frecuencia de resonancia.

Otra de las pruebas que se han desarrollado para determinar el comportamiento dinámico de los silos es el realizado por Sasaki y Yoshimura (ref. 10).

El trabajo que realizaron los autores consistió en una serie de pruebas en una mesa vibratoria de modelos que simulan silos e intentaron examinar las características dinámicas de vibración y la respuesta de los silos ante las acción de un sismo.

El objetivo principal del trabajo consistió en determinar las características dinámicas en los silos.

El modelo del silo y el procedimiento del experimento se describen a continuación :

Al usar las leyes de similitud, el modelo del silo se diseño a escala 1/6. El modelo del silo es cilíndrico construido por block de morteros (26.5 cm X 8 cm X 2.2 cm) y por zunchos de acero (5 mm de espesor) empotrando el cilindro en una mesa vibratoria de 2.5 m X 2.5 m de dimensiones.

El material de almacenamiento que se utilizó para llenar el modelo de silo es arroz y aserrín.

Las dimensiones del modelo del silo y la profundidad del material almacenado, se presentan en la fig. 6.13.

La mesa vibratoria fué excitada de dos formas diferentes :

- a) Ondas de forma senoidal
- b) Ondas que simulan temblores reales

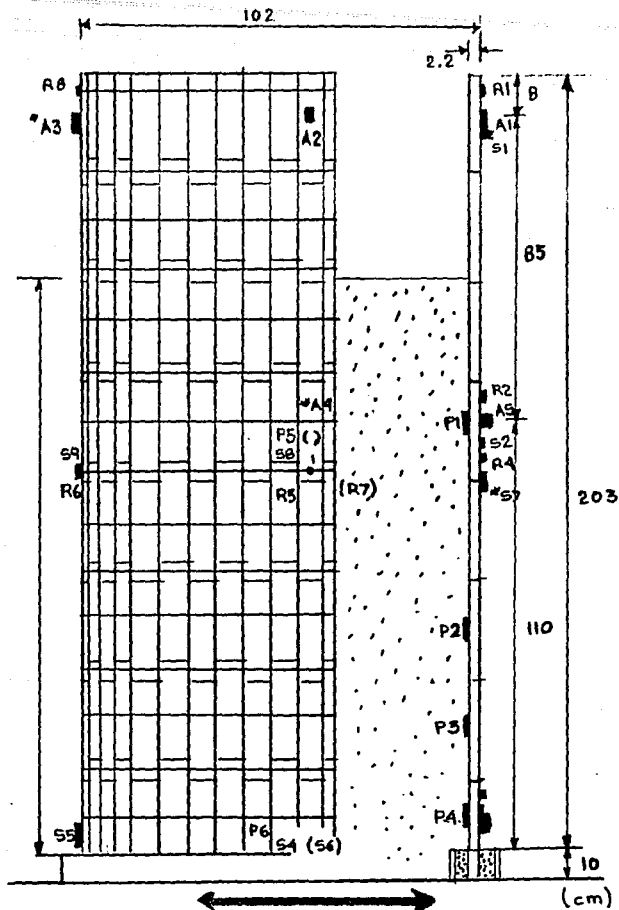


FIG. 6.13 MODELO DEL SILO

Los temblores que se simularon son los de

- El de Nemurohanto-Oki (1973)
- El de Tokachi-Oki (1968)
- El de Hidakasankei (1970)

Se examinaron tres condiciones diferentes de modelo del silo :

1. El caso en que el modelo es llenado con arroz (modelo Full (BR))
2. Modelo llenado con aserrín (modelo Full (SD))
- 3.- Modelo sin material almacenado (modelo Empty)

La aceleración de la pared del silo, la aceleración del material almacenado, los esfuerzos en la pared, los esfuerzos en el zuncho de acero, la presión lateral en la pared provocada por el material almacenado y así como el movimiento de la mesa, son medidos en cada una de las pruebas que se realizaron.

Para poder realizar las mediciones, se instrumentó el modelo del silo según se muestra en la figura 6.13 .

Los resultados que se obtuvieron de las pruebas se muestran en las gráficas de la fig. 6.14, que presenta las curvas típicas de aceleración para cada modelo de los antes señalados.

Los resultados de dichas gráficas, indican que el material almacenado produce distintos cambios en las características de vibración, en donde dicho efecto es claramente notorio en el modelo Full (SD).

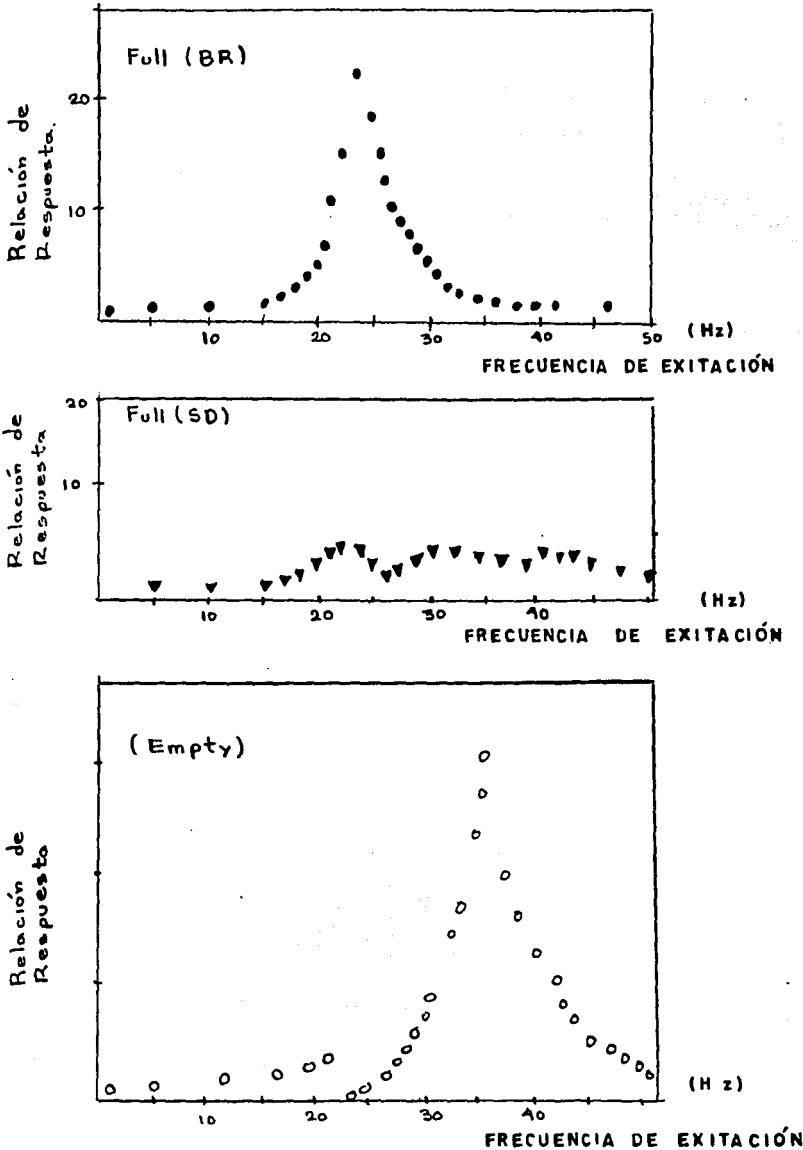


FIG. 6.14 COMPARACIÓN DE LAS CURVAS DE RESONANCIA DE ACCELERACIÓN PARA CADA CASO DE MODELO

En la fig. 6.15 se presentan los acelerogramas correspondientes a un tipo de aceleración de la mesa (sismo de Nemurohanto-Oki) y las correspondientes respuestas que se obtuvieron del acelerómetro A1 (colocado en la pared del cilindro en su parte superior) y del #A4 (colocado en el interior del material almacenado).

Se puede observar en dichos acelerogramas, como la respuesta del material almacenado es mayor que la respuesta que se obtiene de la pared del cilindro.

En la tabla 6-II se presenta un resumen de las máximas respuestas de aceleración que se tiene en cada caso, para la misma excitación de la mesa (sismo de Nemurohanto-Oki).

En dicha tabla se vuelve a observar claramente que la máxima respuesta de aceleración se obtiene en el material almacenado.

Mientras que la respuesta de aceleración del acelerómetro A1 en el modelo Full (SD) decrese, la máxima respuesta del modelo Full (BR) presenta un incremento de aproximadamente 40% en comparación con el modelo vacío.

Así mismo, se encuentra que para niveles altos de aceleración de la mesa vibratoria, difícilmente se encuentra que los esfuerzos en la pared (S3) y en el zuncho de acero (R1, R2, R3) son máximos.

La respuesta espectral que se tiene en el acelerómetro A1 y el acelerómetro #A4 es comparado en cada caso de modelo en la fig. 6.16 .

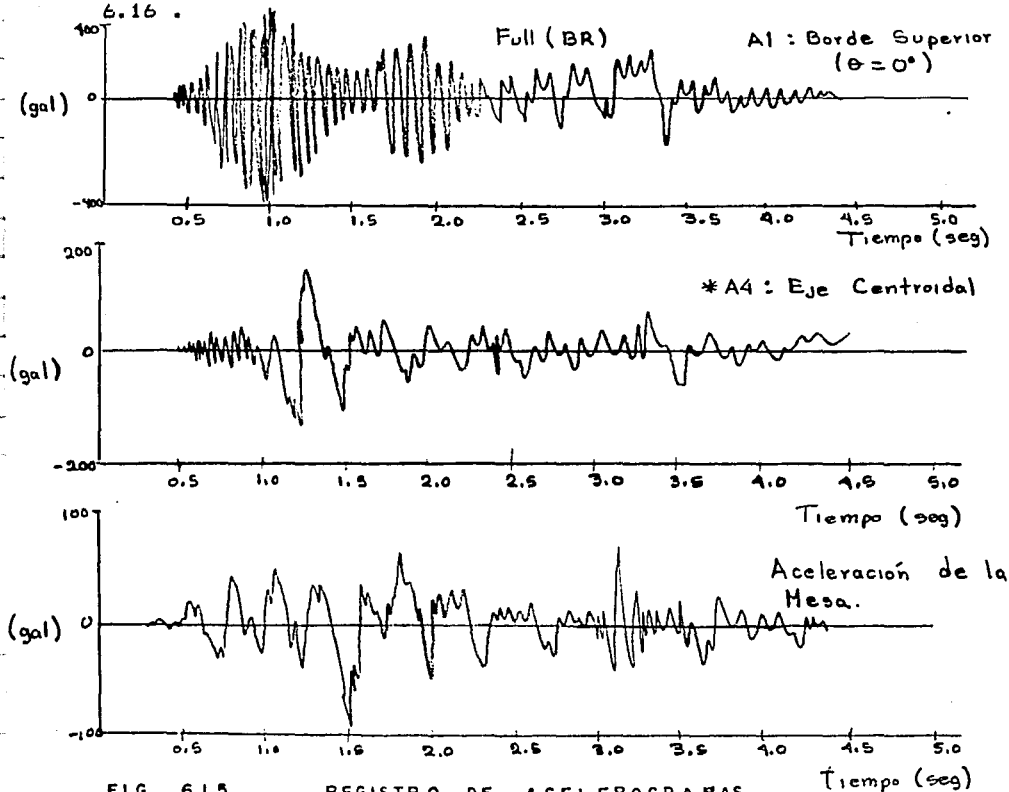


FIG. 6.15

REGISTRO DE ACELEROGRAFÍAS

Tiempo (seg)

Tabla 6-11 Valores de la máxima respuesta en cada caso del modelo

Punto de medición	Full (BR)	Full (SD)	Empty
Aceleración (gale):			
A1: Superficie ( $\theta=0^\circ$ )	294	165	208
A2: Superficie ( $\theta=90^\circ$ )	45	41	74
A5: Mitad ( $\theta=0^\circ$ )	158	126	130
*A4: Mitad (centro)	159	389	
Aceleración mesa	98	102	102
Esfuerzos pared			
S3: Base ( $\theta=0^\circ$ )	3.9	1.4	1.1
*S7: Mitad (junta)	17.2	9.5	6.2
Esfuerzos zuncho			
R1: Superficie ( $\theta=0^\circ$ )	3.3	8.1	8.2
R2: Mitad ( $\theta=0^\circ$ )	3.9	4.5	2.8
R3: Base ( $\theta=0^\circ$ )	1.4	1.1	1.2

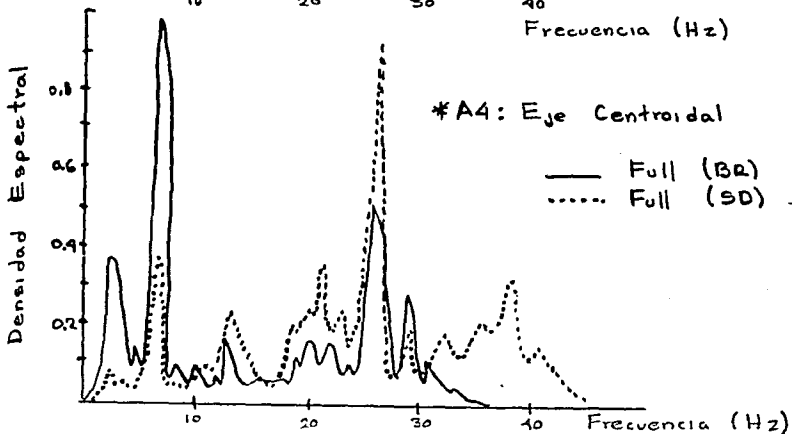
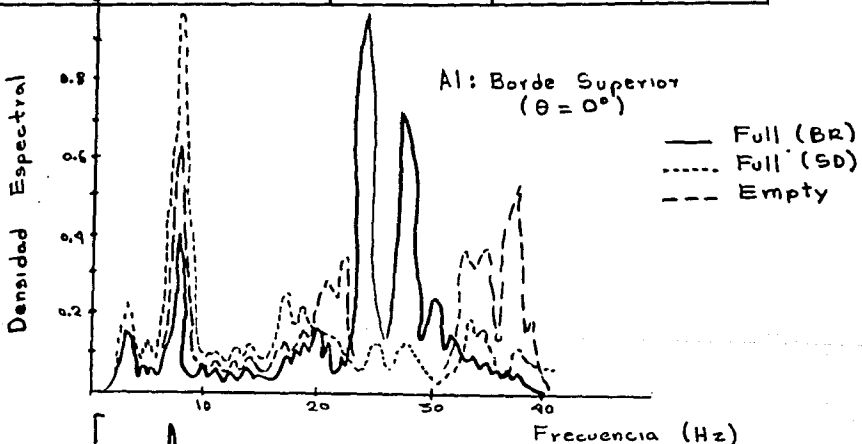


FIG. 6.16 COMPARACIÓN DE LA RESPUESTA ESPECTRAL EN CADA CASO DE MODELO



Estos resultados indican que la respuesta de aceleración a temblores para cada modelo es diferente.

De acuerdo a estos resultados, los autores sugieren que la interacción dinámica entre el material almacenado y la pared del silo, depende considerablemente del material almacenado.

La variación de la respuesta del modelo Full (BR) sometida a la acción del temblor de Nemurohanto-Oki se presenta en la tabla 6-III. La relación de respuesta representa la magnitud de cada máxima respuesta, dividida por la máxima aceleración de excitación de la mesa.

En la fig. 6.17 se presenta la variación de la máxima presión lateral obtenida en el modelo Full (BR). Así mismo, en la figura se observa la distribución de presión estática debido al material almacenado. Los resultados indican que la presión lateral durante el temblor cambia y tiende a una distribución de presión que depende de la aceleración de entrada.

Cuando la aceleración de entrada sobrepasa los 300 gals, ocurre un incremento importante de la presión en el borde superior del cilindro.

Tabla 6-III Variación de la relación de respuesta del modelo Full (BR)

Punto de medición	Aceleración de la mesa (gals)			
	98	208	308	545
Aceleración (gals)				
A1:Superficie( $\theta=0^\circ$ )	3.00	2.82	2.21	1.97
A2:superficie( $\theta=90^\circ$ )	0.46	0.53	0.70	0.65
*A4:Mitad (centro)	1.62	1.48	1.32	1.19
Esfuerzos pared				
S3:Base ( $\theta=0^\circ$ )	3.98	3.80	3.83	3.60
*S7:Mitad (junta)	17.60	12.40	10.80	10.90
Esfuerzos zuncho				
R1:Superficie( $\theta=0^\circ$ )	3.37	3.99	3.99	7.50
R2:Mitad ( $\theta=0^\circ$ )	4.39	4.23	4.21	4.07
R3:Base ( $\theta=0^\circ$ )	1.43	5.82	9.25	8.59

Basados en los resultados tanto experimental como analíticos, los autores presentan las siguientes conclusiones :

- El material almacenado produce distintos cambios en las características de vibrar de los silos. Dichos cambios dependen fundamentalmente del tipo de material almacenado
- la relación del comportamiento dinámico durante la excitación de un temblor, entre la pared y el material almacenado es diferente y depende del tipo de material almacenado
- la estructura de la pared del silo presenta una notable característica de fuerza de restauración, de tipo de histerésis, la cual es de tipo de flexión elástica.

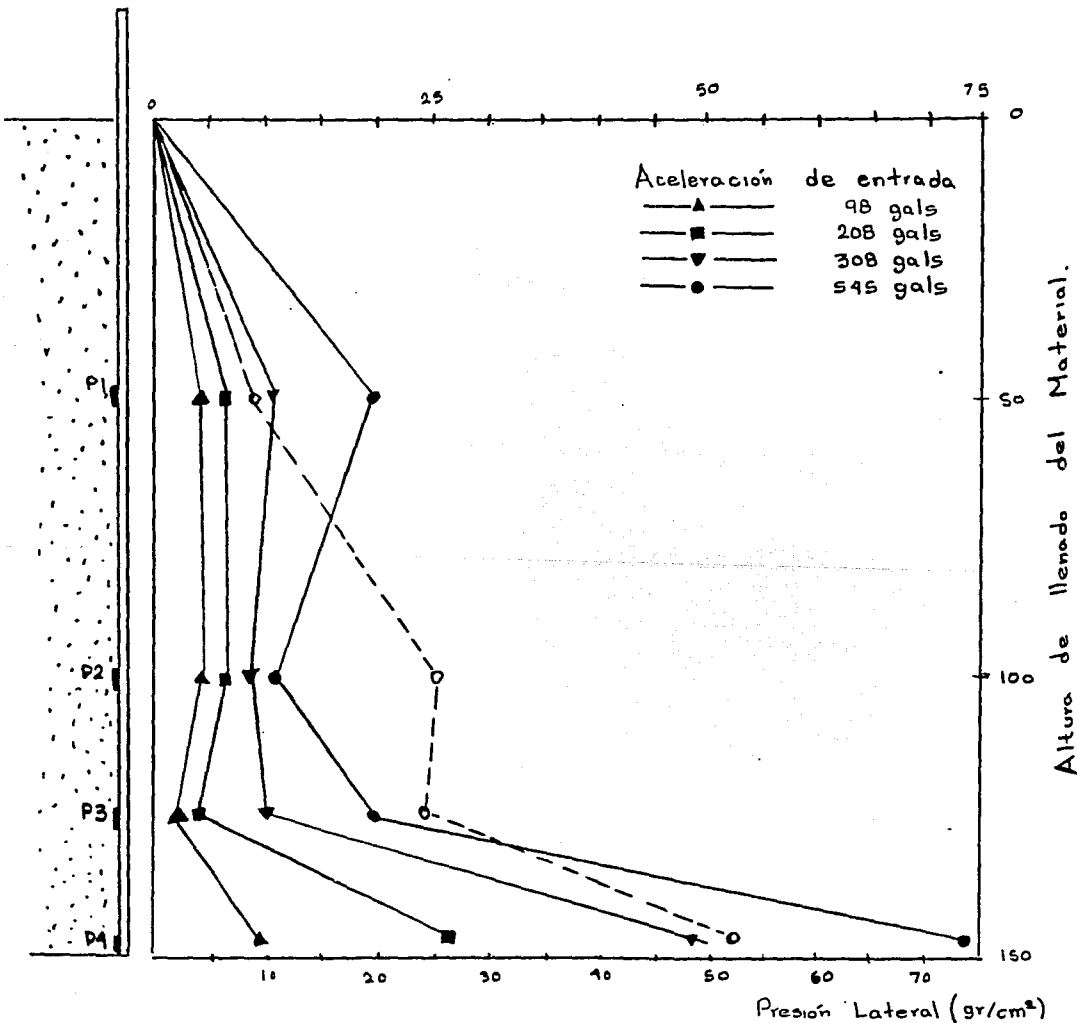


FIG. 6.17 DISTRIBUCIÓN DE LA MÁXIMA PRESIÓN LATERAL EN EL MODELO FULL (BR)

De los estudios más importantes que se han desarrollado se encuentran los realizados por Koichi Shibata y Masuokado (de los cuales está basado gran parte del objetivo de este trabajo) ref. 16.

Los autores tratan de explicar en dichos estudios el comportamiento dinámico de los silos y obtener la masa efectiva de grano y polvo que se almacenan en estos, a partir de modelos experimentales y análisis teóricos de vibración.

También tratan de entender, en un intervalo de tiempo corto, como el grano y el polvo almacenado en el silo se comporta como fluido. Para poder realizar dichos estudios los autores utilizaron un modelo que consistía en un tubo de acrílico y otro modelo de tubo metálico, en donde en la parte superior de cada modelo se colocó una placa circular.

En lo que respecta al grano y polvo, se utilizó pequeñas esferas de vidrio y un grano conocido en Japon como Corian (grano parecido al sorgo). En dichos modelos se trata de conocer el comportamiento dinámico del silo cuando éste es sometido al movimiento horizontal de una mesa vibratoria.

Como antecedentes de los experimentos realizados se tiene un artículo escrito por la Sociedad Japonesa de Maquinaria, en el cual muestra que el valor característico de la frecuencia de vibración horizontal del silo no corresponde a lo obtenido experimentalmente. También en el Instituto de Arquitectura de Japon se muestra que la vibración horizontal del silo produce un valor real de la frecuencia de resonancia del orden de la mitad del obtenido con una teoría lineal.

El método de análisis utilizado se limitó principalmente a la búsqueda del primer modo horizontal de vibración y a determinar la expansión de la dimensión radial. Haciendo una comparación entre la teoría y el valor experimental se muestra la posibilidad de obtener el efecto de masa asociada a la frecuencia del primer modo de vibración horizontal.

Para el desarrollo de las pruebas se utilizaron 12 tubos de acero con las características mostradas en la tabla 6-IV en donde:

- L altura del tubo (cm)
- R Radio (cm)
- t espesor de la pared (cm)

tabla 6-IV

L	R	t
180.200	19.821	0.093
108.160	19.802	0.101
40.025	19.809	0.101
135.175	14.861	0.102
81.000	14.850	0.097
30.070	14.858	0.100
90.150	9.910	0.102
54.054	9.872	0.103
19.97	9.865	0.103
45.100	4.944	0.100
26.940	4.917	0.100
10.170	4.881	0.100

En lo que respecta al modelo de acrílico se utilizaron 15 tipos de tubos diferentes según se muestra en la tabla 6-V.

tabla 6-V

L	R	t1	t2
10.5	5	0.2	0.4
15.5	5	0.2	0.4
20.5	5	0.2	0.4
25.5	5	0.2	0.4
30.5	5	0.2	0.4
35.5	5	0.2	0.4
40.5	5	0.2	0.4
45.5	5	0.2	0.4
50.5	5	0.2	0.4
55.5	5	0.2	0.4
60.5	5	0.2	0.4
65.5	5	0.2	0.4
70.5	5	0.2	0.4
75.5	5	0.2	0.4
80.5	5	0.2	0.4

en dichos modelos se efectuaron dos tipos de pruebas :

- Vibración forzada por medio de un oscilador
- Experimento de vibración libre

Con el fin de obtener el valor del coeficiente de incremento de masa ( $\alpha$ ) se utilizó un modelo de acrílico el cual fue llenado con canicas de vidrio de 0.5, 1 y 2 mm de diámetro y se hizo vibrar este modelo por medio de la mesa vibradora. La vibración libre para el tubo de acero y acrílico se realizó en la mesa vibradora.

Como una medida del movimiento como fluido de las bolas de vidrio y del grano corian, se utilizaron los tubos de acrílico, se tomaron fotografías del movimiento del fluido y se utilizó polvo de color para poder detectar mejor dicho fenómeno. Para conocer la configuración del modelo y obtener su frecuencia se utilizó el sistema que se muestra en la fig. 6.18.

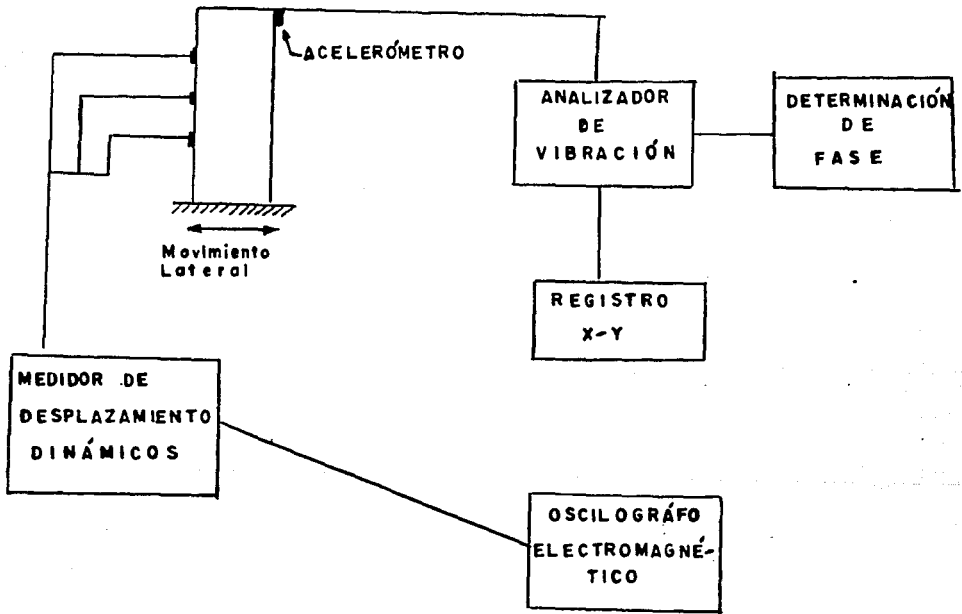


FIG. 6.18 SISTEMA DE MEDICIÓN

En la referencia 16 se hace una descripción detallada del estudio analítico que se realizó para describir el fenómeno presentado en los modelos, describiendo sus formas modales de vibración, fuerzas cortantes y desplazamientos.

Se hicieron comparaciones de análisis numéricos y soluciones aproximadas las cuales se presentan en la fig. 6.19 y 6.20.

En dichas figuras se comparan tres métodos :

- a) Método de Rayleigh, con curva de deformación estática
- b) Método de Rayleigh, con curva de función trigonométrica
- c) Método de Ritz-Rayleigh.

Cuando se utilizó éste último método se consideró que en la deformación actuaban esfuerzos de membrana.

En la figura 6.19 se condensaron los resultados obtenidos para cada frecuencia. En dichas figuras aparecen tres grupos de curvas correspondientes a diferentes valores de la relación  $X = L/R$ .

En la gráfica el valor de  $\beta$  es igual a la relación del peso por unidad de superficie de la placa y el peso de la pared del silo.

Al considerar en los métodos a) y b) los pesos propios de los silos como energía potencial, se observa que en estos métodos existe poca diferencia al cambiar los valores de  $\beta$  según se indica en la figura 6.19 .

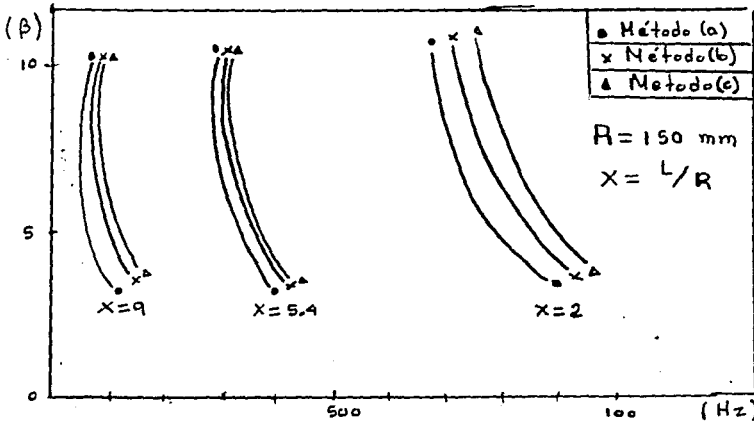


FIG.6.19 COMPARACIÓN DE ANÁLISIS NUMÉRICOS CONSIDERANDO ESFUERZOS POR FLEXION

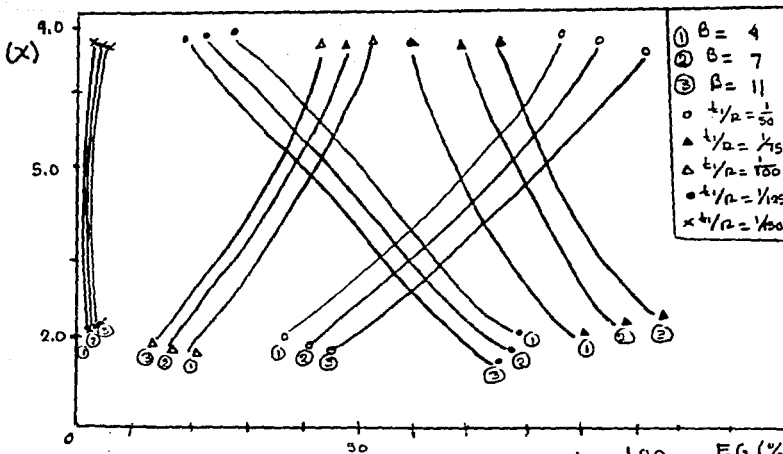


FIG.6.20 COMPARACIÓN DE ANÁLISIS NUMÉRICOS CONSIDERANDO ESFUERZOS DE MEMBRANA

Componente de Energía

En lo referente a la figura 6.20, depende del valor de  $X$ , cuando se pueda relacionar la energía potencial de flexión con la de membrana. La energía potencial almacenada en esfuerzo y la energía cinética almacenada en la cubreplaca se intercambia a medida que la relación  $t/R$  cambia de  $1/50$  a  $1/150$ .

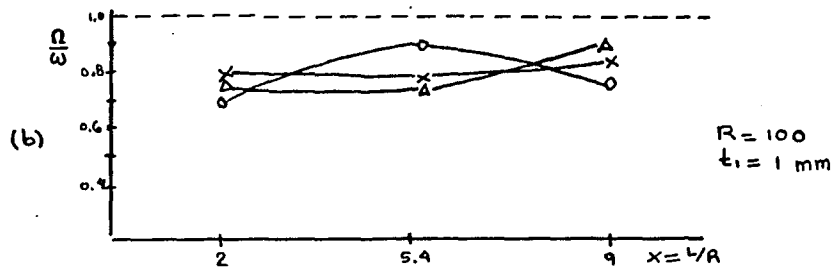
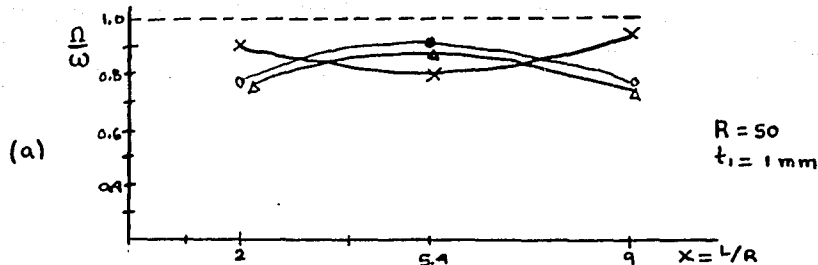
Quando se comparan los valores obtenidos en la teoría de Rayleigh con los valores experimentales en el caso del modelo de acero usando los valores de las relaciones  $L/R = 9, 5, 4, 2$  y  $t/R = 1/200, 1/150, 1/100$  y  $1/50$  se obtuvieron los valores que se muestran en las figuras 6.21a, b, c, d y 6.22a, b, c, d.

En la tabla 6-VI se comparan los resultados experimentales y los resultados obtenidos de la referencia 16 y con el método de Rayleigh para  $R=250$  y  $t=1$ ,  $R=200$  y  $t=1$ .

Tabla 6-VI

$X$	$\beta$	* / Rayleigh (1)	* / rayleigh (2)	(2) / (1)
8.1	5.1	78.4	97.74	0.80
$t/R=1/200$	7.67	68.6	85.44	0.80
	10.22	63.9	74.40	0.83
5.4	2.4	140.0	178.47	0.78
$t/R=1/250$	9.9	92.0	112.84	0.82

\* referencia 16



○ ;  $\beta = 4$   
 △ ;  $\beta = 7$   
 × ;  $\beta = 11$

Ω ; Valor experimental  
 ω ; Valor Teórico

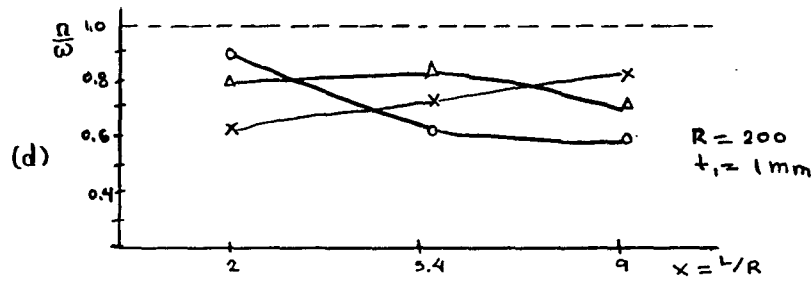
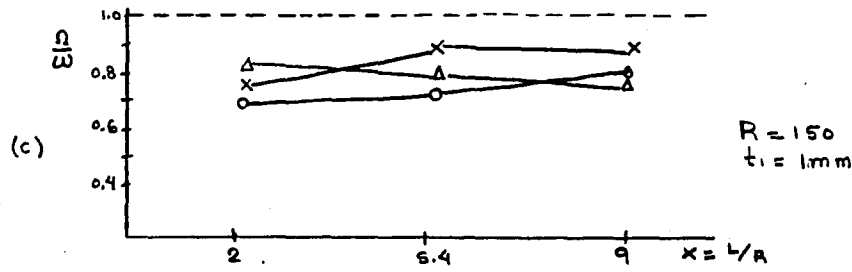
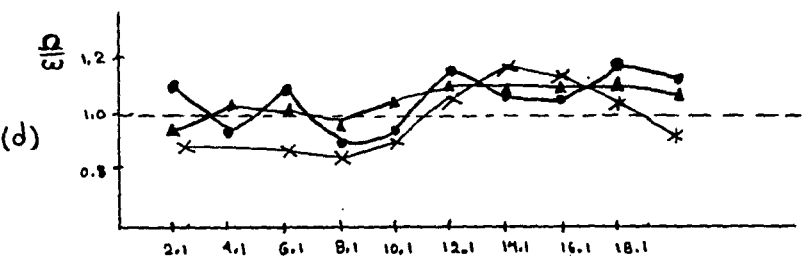
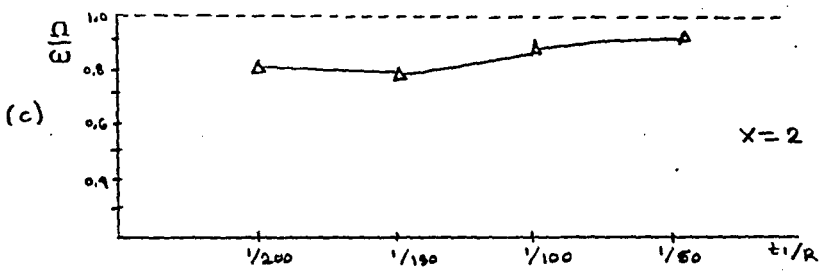
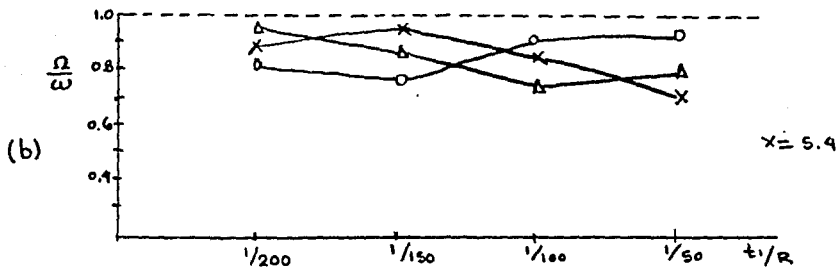
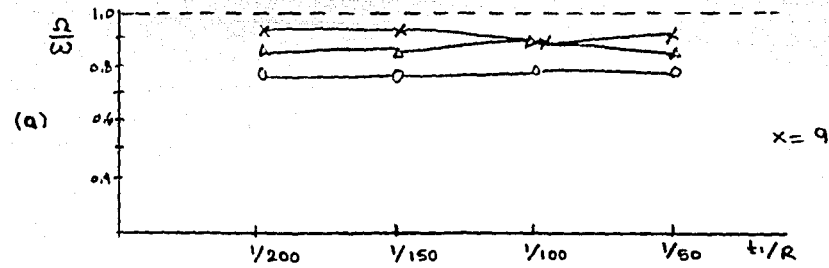


FIG. 6.21 COMPARACIÓN DE VALORES EXPERIMENTALES CON ANALÍTICOS





$\Omega$  ; Valor experimental  
 $\omega$  ; Valor Teórico  
 $o$  ;  $\beta = 4$   
 $\Delta$  ;  $\beta = 7$   
 $x$  ;  $\beta = 11$

$x$  ;  $\beta = 2$   
 $\bullet$  ;  $\beta = 8$   
 $\blacktriangle$  ;  $\beta = 19$

FIG.6.22 COMPARACIÓN DE VALORES EXPERIMENTALES CON ANALÍTICOS

En la figura 6.19 se muestra el caso en que  $\beta$  es muy grande (cuando se coloca una placa gruesa en la parte superior del silo) y mediante el método b) se observa la relación que existe entre el movimiento traslacional y rotacional, sin que exista cambio en la frecuencia lateral. Por ello no se considera necesario aceptar 2 frecuencias de resonancia para el caso  $n=1$  del primer modo traslacional, sólo se requiere conocer una sola frecuencia.

Cuando los silos se encontraban vacíos o con carga total, los autores sólo buscaron una frecuencia correspondiente a la del primer modo.

En la tabla 6-VII se presenta en forma resumida los valores que se obtuvieron para el 2° y 3° modo de vibrar con diferentes valores de L y R, en donde n indica la forma modal lateral y m indica la forma modal radial.

En la fig. 6.23 se muestra esquemáticamente la forma en que el grano se comporta como fluido, cuando el modelo del silo de acrílico es sometido a la frecuencia de resonancia correspondiente. En la fig. 6.23a se observa como a partir de la línea C-D se mueven las partículas hacia los puntos A y B formando un pico. Así mismo, en la figura 6.23b y 6.23c se muestra como el material cae de AB a EF.

Tabla 6-VII  $n=1$

L (cm)	R (cm)	m=2				m=3			
		$\beta=2$	$\beta=4$	$\beta=10$	$\beta=14$	$\beta=2$	$\beta=4$	$\beta=10$	$\beta=14$
50.5	5	514.4	453.2	350.3	311.0	1105.3	937.1	750.6	704.6
55.5	5	443.7	397.7	307.6	214.0	988.5	876.7	683.6	643.0
60.5	5	388.3	346.7	273.3	257.6	884.0	791.5	626.2	590.5
65.5	5	338.9	304.0	242.2	228.6	779.4	813.2	566.9	534.9
70.5	5	299.5	270.5	216.9	205.1	710.5	642.4	516.0	487.9
75.5	5	266.5	241.8	195.4	185.0	641.0	583.3	473.0	848.1
80.5	5	238.5	217.3	176.8	167.7	573.3	528.3	438.3	417.1

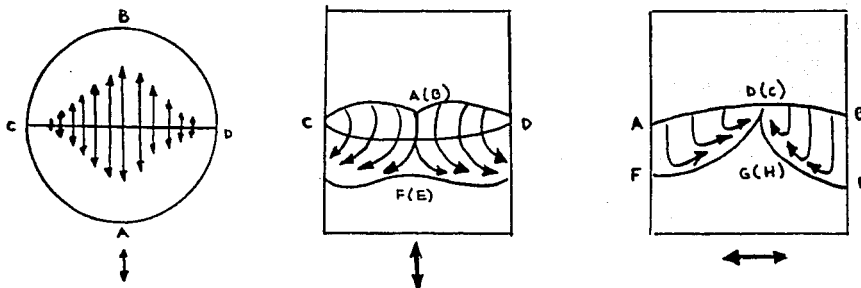


FIG. 6.23 MOVIMIENTO DEL GRANO COMO FLUIDO CUANDO SE PRESENTA RESONANCIA

En la fig. 6.24 se muestra la forma en que se trazó en la parte exterior del tubo de acrílico la configuración del material cuando se presentó el flujo de fluido en las bolas de vidrio.

Las dos curvas superiores se refieren a las canicas de vidrio, mientras que las dos inferiores son referidas al grano corian. El movimiento lateral de la parte inferior del tubo es de 800 gals.

Para describir el flujo de masa se muestra como primer paso la variación de la frecuencia natural en el primer modo al cambiar el volúmen de grano y polvo dentro del recipiente durante el experimento.

En las figuras 6.25a y 6.25b se muestra el cambio de la frecuencia natural cuando se varían la altura del grano almacenado, en dichas figuras  $X = L/R$  varía entre 6 y 16, así mismo  $L_0$  representa la altura a la que se ha llenado el tubo con el material de almacenamiento.

Para analizar el efecto de la masa en un silo, los autores proponen el siguiente método :

El peso por unidad de longitud del grano  $Q_0$  y el peso por unidad de longitud dentro del tubo  $Q_i$  y definiendo a  $\alpha (Q_i/G)$  como la masa efectiva, se puede escribir la siguiente relación :

$$Q = Q_0 + \alpha Q_i$$

En donde la energía potencial resulta ser  $Pfsg$  y la correspondiente energía cinética  $KfpVR\rho^2$  y considerando el efecto de  $Pex^2$  y de  $(Pfsq)(KfpVR)$  de manera que se obtenga la siguiente ecuación :

$$A1 \alpha^3 + A2 \alpha^2 + A3 \alpha + A4 = 0$$

A partir de la ecuación anterior se encuentran sus raíces por un método gráfico. Una vez obtenidas las raíces se puede trazar la gráfica que se presenta en la fig. 6.26 en donde se obtiene el valor del coeficiente  $\alpha$  (masa efectiva) a partir de un valor dado de la frecuencia.

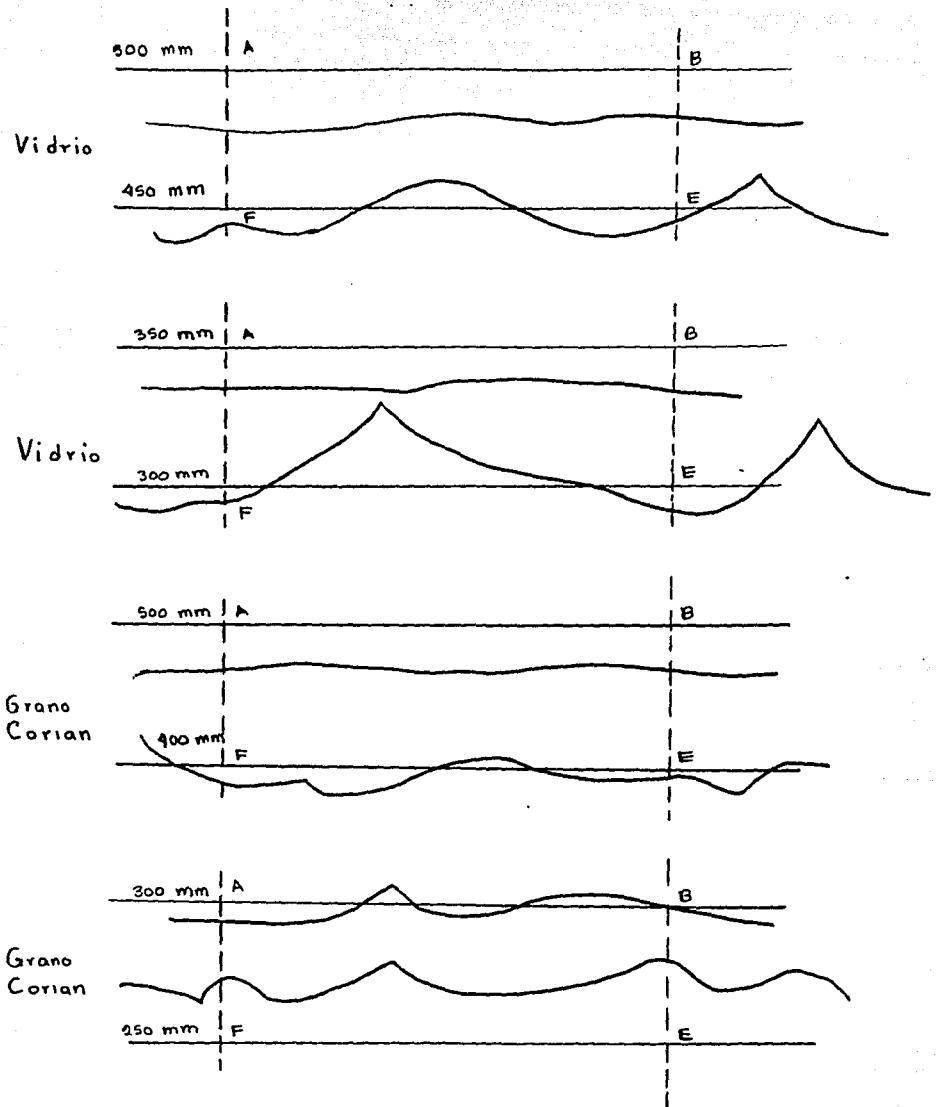
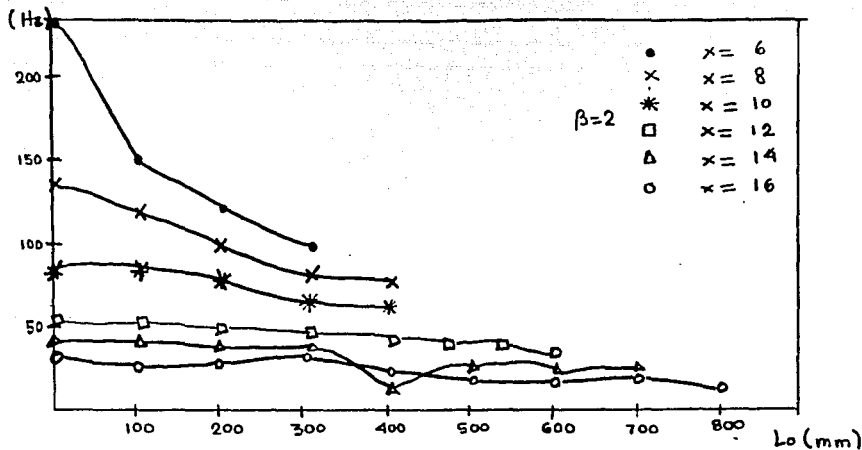


FIG. 6.24 CONFIGURACIÓN DEL MATERIAL EN EL MOVIMIENTO COMO FLUIDO



(a) Bolas de vidrio.

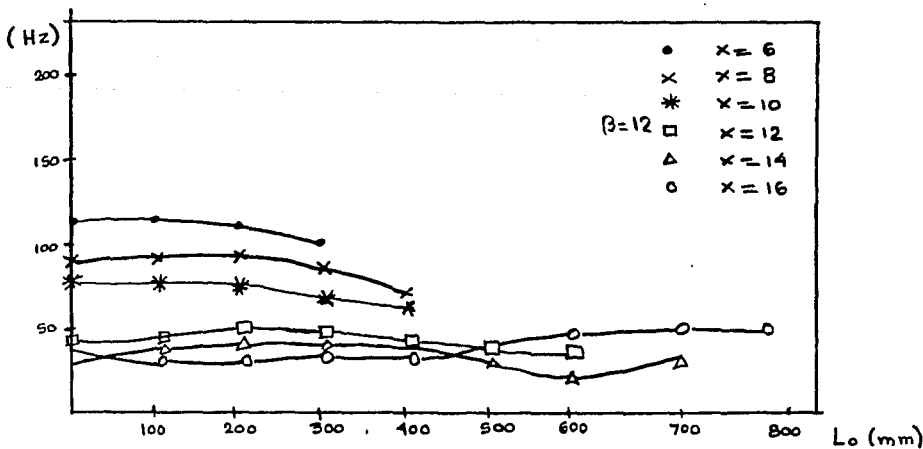


FIG. 6.25 VARIACIÓN DE LA FRECUENCIA CON LA CANTIDAD DE GRANO ALMACENADO

Según los resultados obtenidos se muestra que el valor  $\alpha$  está entre 0.5-0.7 para las bolas de vidrio, mientras que para el grano corian se encuentra entre 0.69-0.87.

Otro de los resultados importantes que se obtuvieron son las gráficas de la fig. 6.27, en donde se muestra la variación de la frecuencia de resonancia del tubo, para diferentes alturas de llenado del material, correspondientes a sus masas efectivas.

Se observa en dicha figura que el valor máximo de la frecuencia se obtiene cuando el tubo está totalmente lleno, pero para dicha condición, el valor del coeficiente de masa efectiva es menor que se obtiene de considerar la masa total.

En la fig. 6.28 se presentan las gráficas de como varían la frecuencia respecto a la cantidad de material almacenado. En dichas gráficas se aprecia que cuando se llega a un valor de 1/4 de la altura total del silo existe un cambio significativo en el valor de la frecuencia.

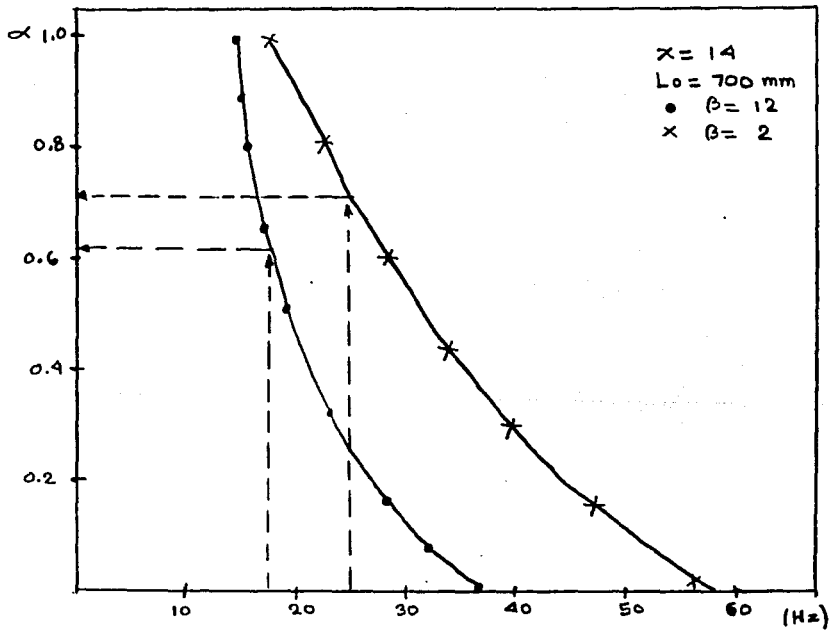


FIG. 6.26 CURVA FRECUENCIA - MASA EFECTIVA

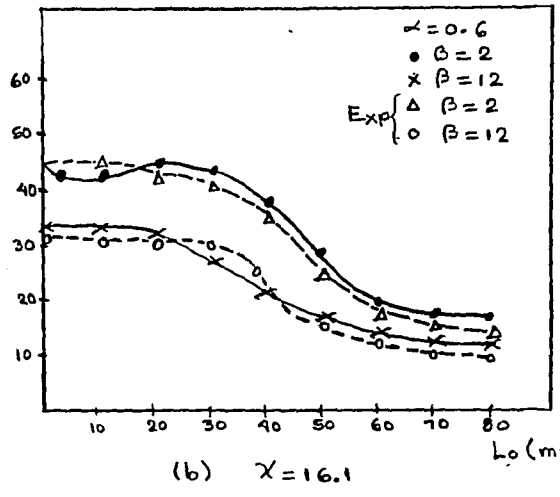
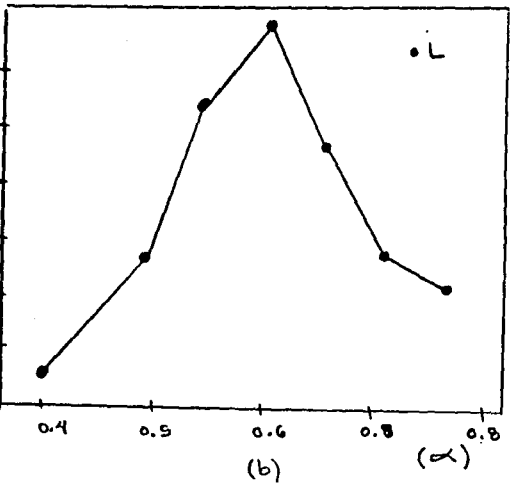
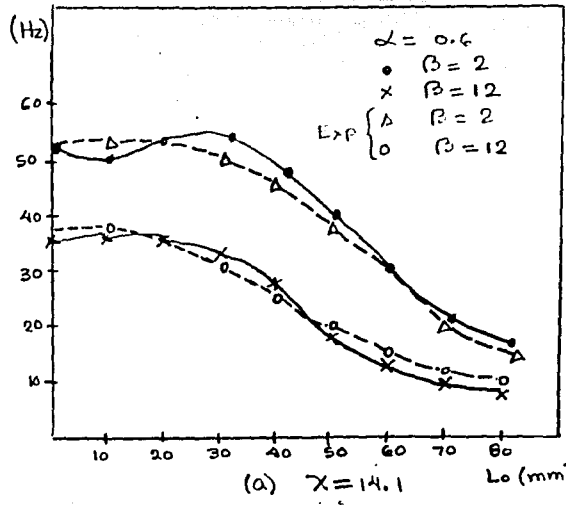
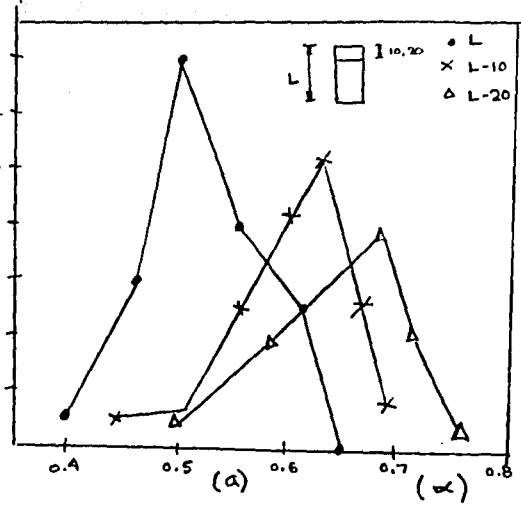


FIG. 6.27 VARIACIÓN DE LA FRECUENCIA CON LA ALTURA DE LLENADO

FIG. 6.28 VARIACIÓN DE LA FRECUENCIA CON LA CANTIDAD DE MATERIAL ALMACENADO

Se observa en las gráficas de la figura anterior que es muy similar al comportamiento de las curvas obtenidas, tanto experimental como analíticamente.

El comportamiento de las curvas indican un cambio notable del valor de la frecuencia cuando el tubo se llena a una altura comprendida entre  $1/3$  y  $1/2$  de la altura total del silo.

De acuerdo a las gráficas obtenidas los autores proponen que cuando se trabaja en cálculos analíticos con alturas del material almacenado menores de  $1/3$  de la altura total del silo, existe poca variación de la frecuencia, lo que provoca que no haya ningún efecto dinámico de masa efectiva.

En el caso de vidrio, el valor de  $\alpha$  es independiente del radio de las bolas de vidrio, ya que no importa cual sea su tamaño, aunque los autores piensan que existe algún efecto producido por la superficie de granos, la forma y el contenido de agua de los materiales que se almacenan.

Así mismo los autores hacen notar que  $\alpha$  depende del tipo de material que se use cuando se considere el efecto de gravedad mediante el empleo del término  $\alpha Q_i$ . Los autores calcularon la influencia de este término en los resultados, pero concluyen que su efecto es menor del 1%.

Del mismo autor Koichi Shibata se muestra a continuación el estudio desarrollado para determinar las características de vibración de un silo a escala real (ref. 23).

El estudio está basado en experimentos con un silo de escala real, en donde compara los resultados de estos experimentos, con los obtenidos de pruebas de modelos de silos a escala reducida similares a los desarrollados por el autor en la referencia 16 (antes mencionados).

En forma resumida y a manera de tablas y figuras se presentan las dimensiones, características y propiedades de los silos utilizados. La tabla 6-VIII y fig. 6.29 están referidas al modelo del silo de acero a escala reducida; la tabla 6-IX a los tipos de materiales de almacenamiento empleados durante las pruebas y la tabla 6-X y fig. 6.30 corresponden al silo de escala real.

Primeramente se mencionan las pruebas en modelos de silos de acero a escala reducida. Se tienen dos tipos de pruebas :

- 1) Pruebas de vibración libre
- 2) Pruebas utilizando una mesa vibratoria

Para cada una de estas pruebas el modelo se ensaya en diferentes condiciones :

- a) Con el modelo del silo vacío
- b) Con el modelo completamente lleno con grano y polvo (mencionados en la tabla I)
- c) Con el modelo conteniendo material en  $2/8$ ,  $3/8$ ,  $4/8$ ,  $5/8$ ,  $6/8$ ,  $7/8$  y  $8/8$  de su capacidad.



Tabla 6-VIII Datos del Modelo de silo

Diámetro Interior	50.172 cm
Espesor del cilindro	0.099 cm
Longitud	401.300 cm
Peso del Cilindro	30.833 Kg
Peso Específico	7.742 gr/cm
Módulo de Young	$2.1 \times 10^6$ Kg/cm
Relación de Poisson	0.333

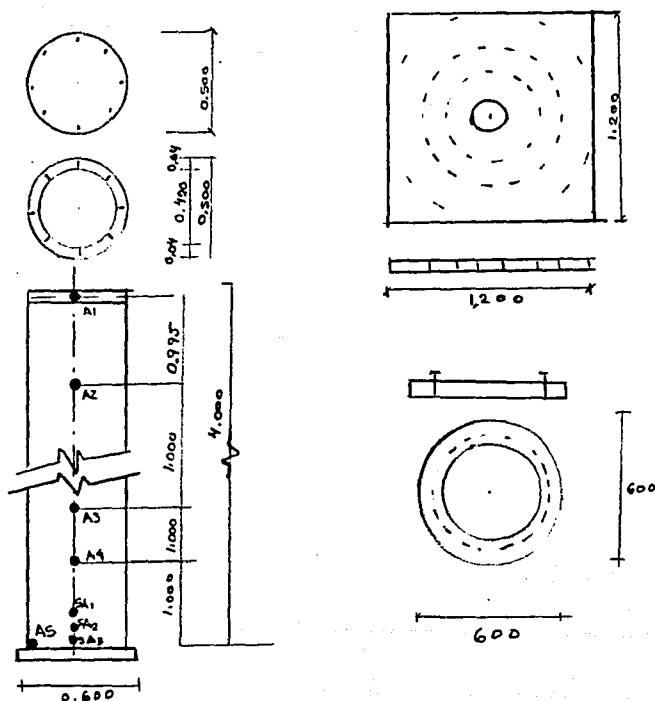


FIG.6.29 DIMENSIONES DEL MODELO Y PUNTOS DE MEDICIÓN

Tabla 6-IX Datos de Granos y Polvos

Tipo	Peso Especifico	Diámetro del Grano	Silo
Sorgo	0.766 gr/cm	3.0 mm	modelo
Betabel	0.729 gr/cm	12.2 mm	modelo
Harina	0.679 gr/cm	0.097 mm	modelo
Ceniza	0.949 gr/cm	0.070 mm	modelo
Carbón	0.927 gr/cm	11.0 mm	modelo
Cebada	0.707 gr/cm	3.0 mm	Escala Real

Tabla 6-X Datos del Silo a Real

Diámetro Interior	500 cm
Peso del cilindro	12259 Kg
L4	1658.4 cm
L3	757.5 cm
L2	606.0 cm
L1	193.1 cm
T4	0.45 cm
T3	0.60 cm
T2	0.70 cm
T1	0.80 cm
Módulo de Young	$2.1 \times 10^6$ Kg/cm
Relación de Poisson	0.333

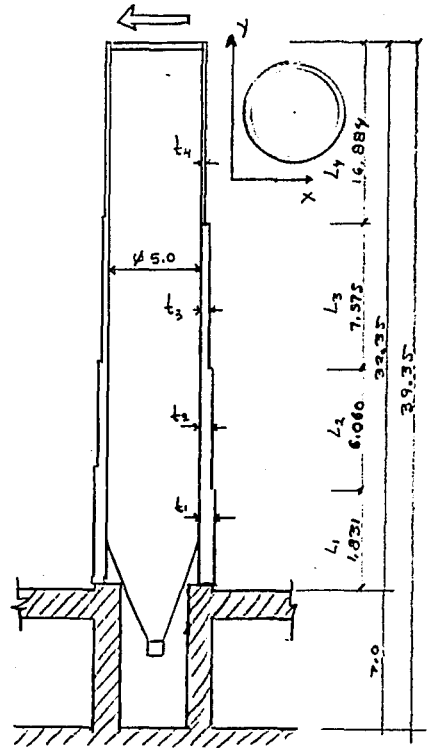


FIG.6.30 DIMENSIONES DEL SILO A ESCALA REAL

Para todos los casos mencionados se miden los desplazamientos y aceleraciones en el modelo; en base a estos datos se calculan los valores de la frecuencia natural de vibrar y el coeficiente de amortiguamiento del sistema.

En lo referente al silo de escala real, igualmente se tienen dos tipos de pruebas :

- a) Pruebas de vibración libre
- b) Pruebas de vibración simulando un microtemblor

En las pruebas de vibración libre, en el que se aplican fuerzas laterales estáticas en la parte superior de las paredes del silo, éste se llena con cebada a diferentes alturas de 2/8, 3/8, 4/8 y 8/8 de su capacidad.

Al igual que en las pruebas con modelos, el valor de la frecuencia natural y el coeficiente de amortiguamiento se obtienen a partir de los registros de aceleración y desplazamiento en el silo. La forma en que se instrumentaron los silos se muestra en la figura 6.30.

En las pruebas simulando un microtemblor se midieron aceleraciones y desplazamientos, en donde la frecuencia dominante se obtiene del espectro de respuesta. La forma en que se simula el microtemblor es operando al silo en un intervalo de tiempo con carga y descarga del material almacenado.

Una vez obtenidos los valores experimentales, se utiliza un método analítico para obtener las características dinámicas del silo.

El método empleado es el de matriz de transferencia. En este método se idealiza al silo como una serie de masas concentradas como se muestra en la fig. 6.31, en este modelo matemático empleado se considera la existencia de rotación y desplazamiento en la base (interacción suelo estructura) ver fig. 6.32, en esta figura KH representa la traslación rígida del sistema y K $\theta$  a la rotación rígida del sistema.

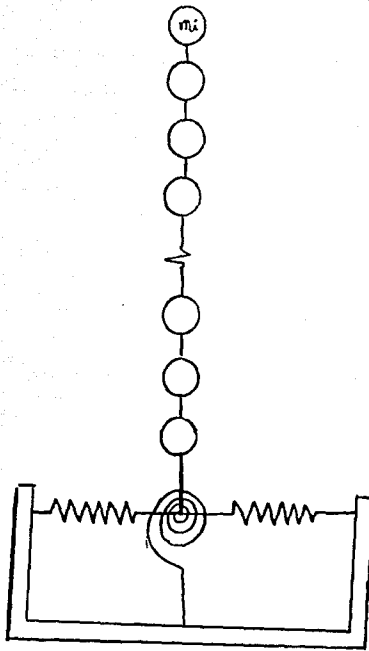


FIG. 6.31 IDEALIZACIÓN DEL MODELO DE MASAS CONCENTRADAS

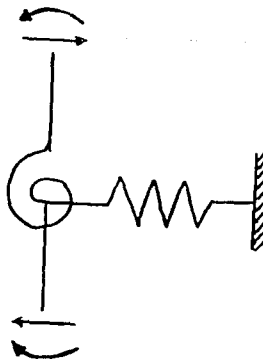


FIG. 6.32 IDEALIZACIÓN DE INTERACCIÓN SUELO-ESTRUCTURA

Del mediante el planteamiento y desarrollo de la matriz de transferencia, como se menciona en el capítulo V, se puede llegar a obtener una ecuación en que interviene tanto la matriz de transferencia del sistema como el valor de la frecuencia (ref.24):

$$Z_n^R = P_n F_n P_{n-1} F_{n-1} \dots P_1 F_1 P_0 Z_0^R$$

$$|P_n F_n P_{n-1} F_{n-1} \dots P_1 F_1 P_0| = 0$$

donde :

$Z_n^R$  Vector estático a la izquierda de la masa n

P Punto de la matriz de transferencia

$F_n$  Campo de la matriz de transferencia

$Z_0^R$  Vector estático a la derecha de la masa n

Por otro lado, cuando se realiza el análisis dinámico del silo, el grano y polvo contenido en el silo se considera como masa dinámica, pero normalmente, solamente parte del grano y polvo se pone en movimiento. La relación de grano y polvo considerados en movimiento define el concepto de masa efectiva ( $\alpha$ ).

Del mismo análisis por el método de la matriz de transferencia se puede obtener el valor de ( $\alpha$ ). Cuando  $\alpha$  es incógnita en la ecuación para determinar la frecuencia en el sistema  $f(\alpha)$  se determina por medio de la matriz de transferencia. Los valores  $\alpha$  se obtienen al sustituir el valor de las frecuencias obtenidas en forma experimental y sustituyendolo en la ecuación de matriz de transferencia antes mencionada.

Se puede también calcular los parámetros de rotación rígida (K $\theta$ ) y traslación rígida (H) a partir de los datos obtenidos de las pruebas de vibración libre utilizando el silo vacío.

Del estudio experimental y analítico se tienen los siguientes resultados:

- Al comparar los resultados analíticos con otras teorías ver (tabla 6-XI) se observa gran similitud con los obtenidos con el método del elemento finito

- Para la primera forma modal de vibración horizontal en el modelo del silo, se presentan poca diferencia entre los resultados analíticos y experimentales (tabla 6-XII)

- Referente a los estudios experimentales se tiene en general diferencia de +/-8% del valor de la rigidez del sistema obtenido para el silo vacío y con silo lleno empleando diferentes materiales (tabla 6-XIII)

En la tabla 6-XIV se muestran los valores de frecuencia natural y de la constante de amortiguamiento para el modelo del silo para diferentes materiales de almacenamiento.

De acuerdo a la tabla 6-XIV las frecuencias en las pruebas de vibración libre son mayores que en las pruebas de vibración forzada, de manera contraria sucede con la constante de amortiguamiento al resultar menor con las pruebas de vibración libre.

La figura 6.33 presenta la frecuencia natural del silo al variar gradualmente el contenido de betabel. Es de notarse en la gráfica de la fig. 6.33 que el valor de la frecuencia en vibración horizontal es afectada a partir de 1/4 de llenado de la capacidad del silo.

De la misma forma que se mostró para el modelo del silo, en la tabla 6-XV y 6-XVI se muestran las rigideces rotacional y traslacional obtenidas en el silo a escala real. En la tabla 6-XVI se indican la frecuencia natural y la constante de amortiguamiento para las mismas pruebas al variar gradualmente la cantidad de material almacenado. Igualmente en la figura 6.34 y 6.35 se observa como se comporta la frecuencia al variar la cantidad de material almacenado para el 1° y 2° modo de vibrar del silo respectivamente.

Para el primer modo de vibrar, al igual que en el modelo del silo, el valor de la frecuencia tiene poca variación hasta 1/4 de la capacidad del silo; mientras que para el 2° modo de vibración se podría considerar que es constante a partir de 1/3 de la capacidad del silo.

Referente al comportamiento de  $\alpha$ , se pueden examinar los resultados del análisis en la curva  $\alpha - f$  que se obtuvo de los resultados del modelo del silo; el comportamiento de  $\alpha$  en el caso de variación gradual del grano y polvo, se presenta en la fig. 6.36 para un 1° modo de vibrar y en la fig. 6.37 para un 2° modo de vibrar; en la tabla 6-XVII se muestra la variación de para los diferentes tipos de materiales utilizados.

De las gráficas anteriores se observa que cuando se llena el silo a una capacidad de  $1/4 = 1/3$  la frecuencia natural no es afectada por el valor de  $\alpha$ .

Tabla 6-XI

L=135 cm R= 25 cm	Soc. Jap. Ing. Mec.			Sociedad de Inv. Rayleigh Ritz (Hz)	Sociedad Arq. Rayleigh Hz	Método análisis 2 Hz
	Espesor Cilin. mm	Espesor Cono mm	Hz			
F1	1.0	4.0	151	163	-----	151
F2	4.5	4.5	201	207	202	198

Tabla 6-XII

Dimensiones Modelo	Valor Experimen.	Análisis Método 1	Análisis Método 2
R= 25 cm L=400 cm t=0.1 cm	14.85	15.295	15.298

Tabla 6-XIII Rigidez del Modelo de Silo

	Vacío	Betabel	Harina	Carbón
Rigidez	387.18	422.66	454.46	451.11

Tabla 6-XIV Resultados Experimentales del Modelo de Silo

Tipo de exp. Tipo material	Exp. Vibración Libre		Exp. Vibración Forzada	
	Frec. Hz	cte.amor.	Frec Hz	cte.amort.
Vacío	14.85	0.005-0.010	13.00	0.005
Sorgo	-----	-----	6.26	0.011
Betabel	7.71	0.005-0.007	6.46	0.012
Ceniza	-----	-----	5.84	0.016
Harina	8.15	0.003-0.005	6.45	0.010
Carbón	7.15	0.001-0.005	5.87	0.015

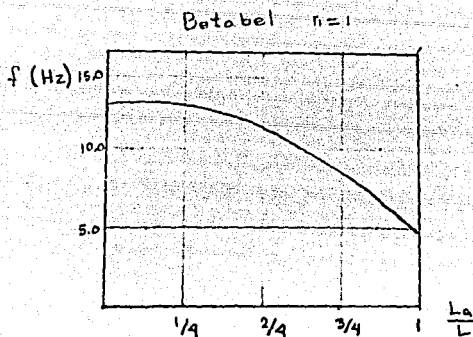


FIG. 6.33 EXPERIMENTO EN MODELO

Tabla 6-XV Rigidez del Silo a Escala Real

KH (Kg/cm)	K $\theta$ (Kg cm/rad)	KH (Kg/cm)	K $\theta$ (Kg cm/rad)
$2.8639 \times 10^5$	$3.2551 \times 10^{11}$	$\delta = 0.079$	$2.1995 \times 10^{11}$
$2.9197 \times 10^5$	$3.3352 \times 10^{11}$		
$2.7357 \times 10^5$	$2.9433 \times 10^{11}$		
$2.8398 \times 10^5$	$3.1779 \times 10^{11}$		

Tabla 6-XVI Resultados Experimentales del Silo a Escala Real

Cantidad de grano	Vibración Libre	Frec. dominante Microtemblor		Amortig.
	Frec. Natural	m=1	m=2	
	m=1	m=1	m=2	m=1
0/B	2.2574	2.425	11.109	0.00946
2/B	2.4100	2.519	10.279	0.00821
3/B	2.415	2.515	8.005	0.00656
4/B	2.3240	2.795	6.605	0.01169
8/B	1.4295	1.465	5.721	0.01706

Tabla 6-XVII

Tipo de Material	Relación de Masa Efectiva
Sorgo	0.70 - 0.87
Betabel	0.70 - 0.77
Arina	0.70 - 0.75
Ceniza	0.70 - 0.80
Carbón	0.70 - 0.75
Cebada	0.70 - 0.80



Para el caso del silo a escala real llenado con cebada, en la fig. 4.35 se muestra el comportamiento de  $\alpha$  para el 1° modo de vibrar y en la fig. 4.36 se observa la variación de la frecuencia con diferentes alturas de llenado y para varios de los valores de  $\alpha$ .

Así mismo, de los dos tipos de gráficas mencionados para el 1° modo, se presentan en las figuras 6.40 y 6.41 los correspondientes al 2° modo de vibrar.

De lo anterior para el 1° modo, cuando la cantidad de grano es de  $1/4 = 1/3$ , el valor de la frecuencia es constante independiente del valor de  $\alpha$ , pero para el 2° modo cuando se tiene grano a  $1/2$  de la capacidad del silo, el valor de la frecuencia permanece constante contrario al 1° modo (ver fig 6.41).

De todo el estudio anterior se pueden mencionar los siguientes comentarios:

- Por medio del análisis de los valores experimentales de la frecuencia natural se puede determinar el valor de la masa efectiva

- El valor de  $\alpha$  oscila en un intervalo de 0.7-0.8 y no significa diferencias en el valor de  $\alpha$  para diferentes tipos de material

- De los resultados obtenidos de modelos y el silo real, no se puede concluir que el grano y el polvo son causa del incremento en el amortiguamiento, así mismo el efecto de la interacción de suelo y silo es un factor muy importante en este aspecto

- Tanto como para el modelo como para el silo real en el 1° modo de vibrar, para una cantidad de grano de  $1/4-1/3$  se produce un comportamiento similar en el valor de la frecuencia. También se tiene gran semejanza en el comportamiento de la frecuencia para un 2° modo de vibrar.

ESTA TESIS NO DEBE  
SALIR DE LA BIBLIOTECA

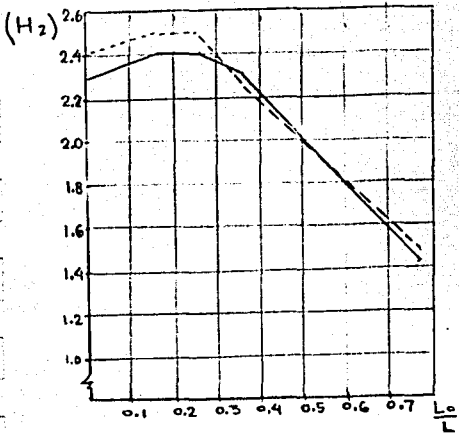


FIG. 6.34 1ª FRECUENCIA NATURAL HORIZONTAL PARA EL SILO A ESCALA REAL

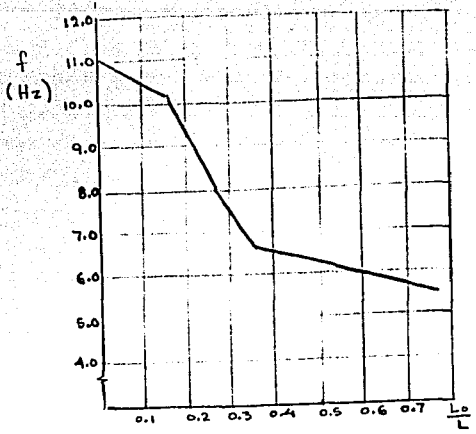


FIG. 6.35 2ª FRECUENCIA NATURAL HORIZONTAL PARA EL SILO A ESCALA REAL

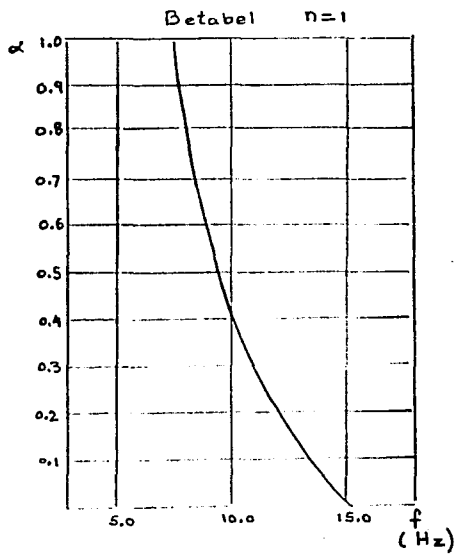


FIG. 6.36 VARIACIÓN DE LA MASA EFECTIVA CON EL VALOR DE LA FRECUENCIA

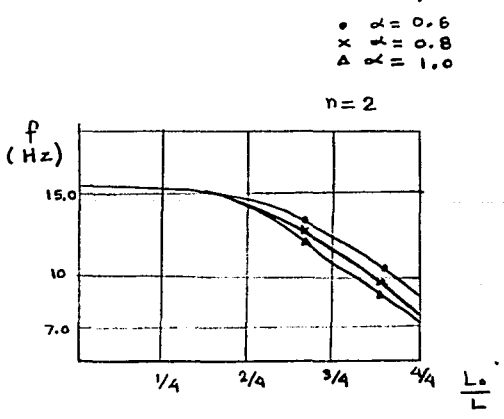


FIG. 6.36 VARIACIÓN DE LA FRECUENCIA CON LA CANTIDAD DE GRANO

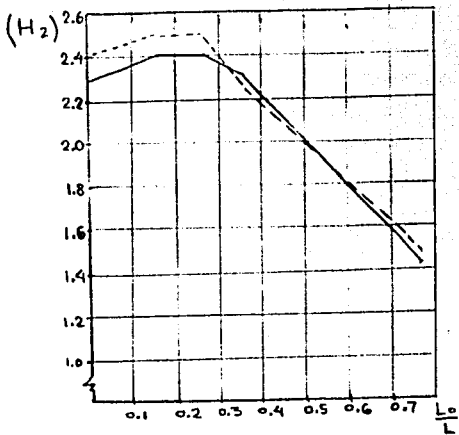


FIG. 6.34 1ª FRECUENCIA NATURAL HORIZONTAL PARA EL SILO A ESCALA REAL

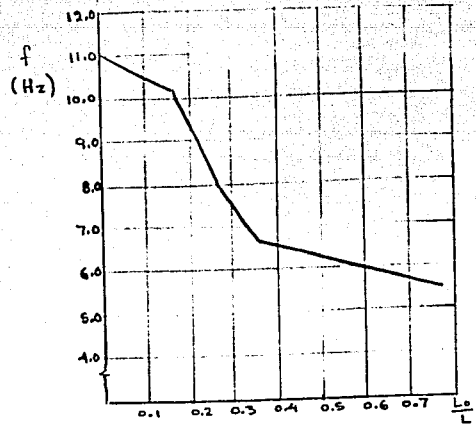


FIG. 6.35 2ª FRECUENCIA NATURAL HORIZONTAL PARA EL SILO A ESCALA REAL

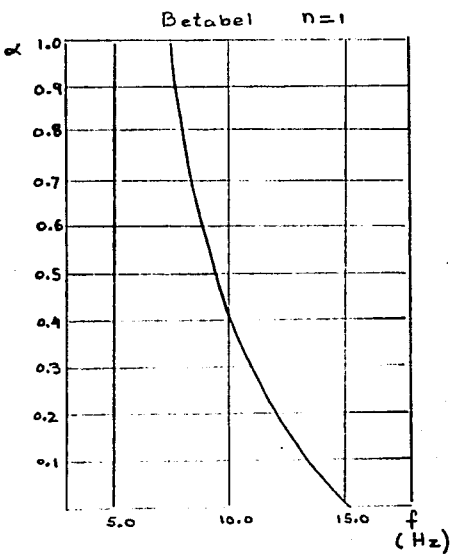


FIG. 6.36 VARIACIÓN DE LA MASA EFECTIVA CON EL VALOR DE LA FRECUENCIA

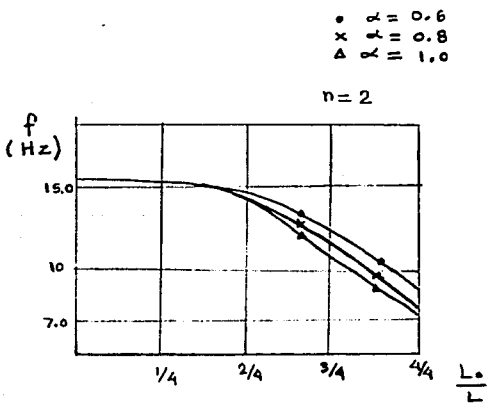


FIG. 6.36 VARIACIÓN DE LA FRECUENCIA CON LA CANTIDAD DE GRANO

De las pruebas efectuadas en México, en las que se intenta describir el comportamiento dinámico de silos, solamente se tiene evidencia de las pruebas desarrolladas en los laboratorios de construcción de la Escuela Nacional de Estudios Profesionales Aragón. Dichas pruebas son asesoradas por el Instituto de Ingeniería de la U.N.A.M. mediante la colaboración del M. en C. Neftalí Rodríguez Cuevas.

Estas pruebas marcan el inicio de lo que será un estudio completo del comportamiento dinámico de los silos que almacenan granos nacionales como pueden ser maíz, trigo, cebada, arroz, etc.

El objetivo principal de estas pruebas, consiste en poder desarrollar modelos que permitan el estudio de los silos; asimismo mostrar que se pueden obtener las características dinámicas de los silos a partir de dichos modelos.

El estudio está enfocado principalmente a poder determinar el fenómeno de masa efectiva descrito en las pruebas desarrolladas por Koichi Shibata (ref. 16 y 23).

Para la realización de las pruebas se utilizaron dos diferentes tubos cilíndricos

- a) Tubo de acero
- b) Tubo de asbesto-cemento

Las dimensiones correspondientes a cada tubo se muestran en la tabla 6-XVIII.

Tabla 6-XVIII

material	R (cm)	t (mm)	H (cm)
Acero (lámina galvanizada, ca-libre 22)	39	0.7595	140
Asbesto-cemento	33,5	20	150

De la tabla anterior:

- R Radio del tubo
- t Espesor de las paredes del tubo
- H Altura del tubo

Las dimensiones propuestas en la tabla 6-XVIII, no están basadas en un estudio de similitud y semejanza. Para determinar dichas dimensiones, solamente se realizaron algunos calculos sencillos para determinar que las frecuencias de resonancia se encontraran en el intervalo de frecuencias mínima y máxima que se puede obtener en la mesa vibratoria.

Al no considerar la teoría de similitud y semejanza no afecta el objetivo de las pruebas, en las cuales solamente se trata de idealizar la fricción que existe entre el grano y la pared del cilindro y así, de esta forma, representar el fenómeno de masa efectiva.

El intervalo de frecuencias que se tiene en la mesa vibratoria se desconocía debido a que ésta máquina fue hecha sin datos básicos; pero con la colaboración del M. en C. Nofal Rodríguez Cuevas, se realizó la correspondiente calibración de la mesa vibratoria (el procedimiento de calibración, propiedades y manejo de la mesa vibratoria se describe en forma detallada en el apéndice de este trabajo).

Los materiales de almacenamiento utilizados durante las pruebas de la mesa vibratoria, son trigo y cebada.

La forma en que se excitó la mesa vibratoria, es de forma senoidal, debido a que la mesa solamente proporciona este tipo de movimiento.

El desarrollo de las pruebas fué como sigue :

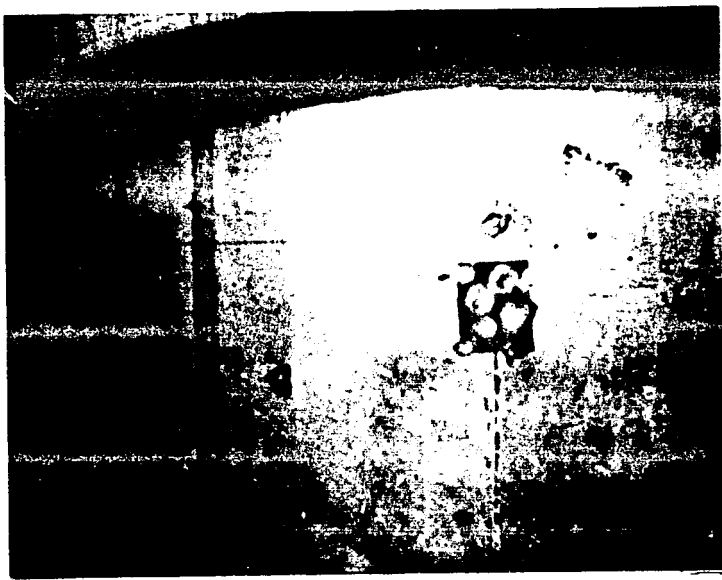
1. Pruebas con el tubo de acero.

El tubo de acero fué construido con una lámina galvanizada calibre 22, la que se roló para formar el cilindro con las dimensiones ya anteriormente especificadas.

La forma en que se unió la lámina, una vez que fué rolada, fué a base de puntos de soldadura y pequeños placas que unían los extremos de la lámina, ver figura 6.42.

El tubo es empotrado en la mesa vibratoria según se observa en las figuras 6.43 y 6.44, por medio de tornillos que atraviesan la mesa vibratoria.

Una vez que se empotró el tubo metálico, se instaló la estructura que se muestra en las figuras 6.45, 6.46 y 6.47 la cual se utilizó para colocar instrumentos de medición. Dicha estructura se tuvo que rigidizar de manera que tuviese el mínimo de movimiento y de esta manera obtener lecturas con un buen grado de confiabilidad.



**FIG. 6,42 UNIÓN DE LA LÁMINA GALVANIZADA PARA FORMAR EL MODELO DEL SILO**

La prueba consistió en obtener la frecuencia de resonancia del primer modo de vibración del cilindro para 5 diferentes condiciones de llenado :

- a) Tubo vacío
- b) Tubo con material de almacenamiento a  $1/4$ ,  $1/2$ ,  $3/4$  y  $4/4$  de la capacidad del tubo.

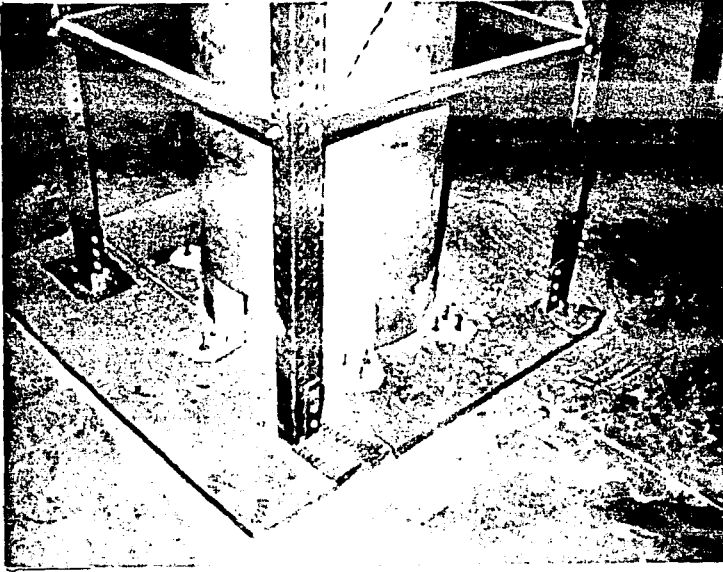


FIG. 6.43 EMPOTRAMIENTO DEL CILÍNDRO EN LA MESA VIBRATORIA

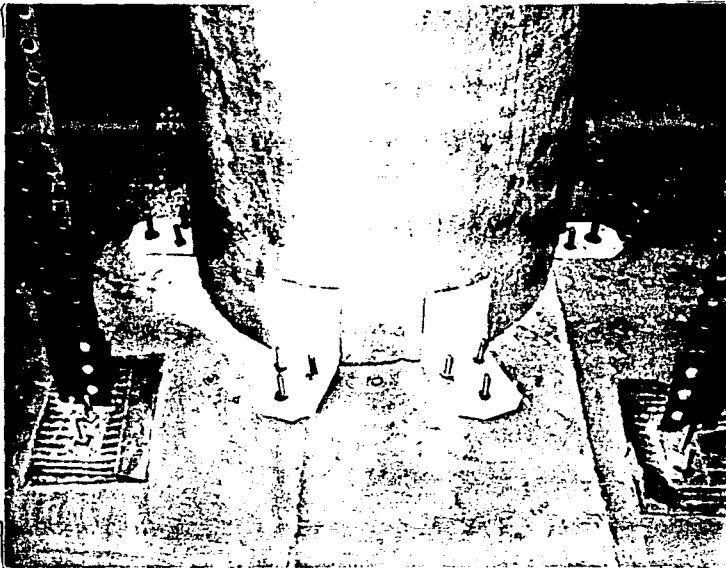


FIG. 6.44 DETALLE DEL EMPOTRAMIENTO DEL CILÍNDRO

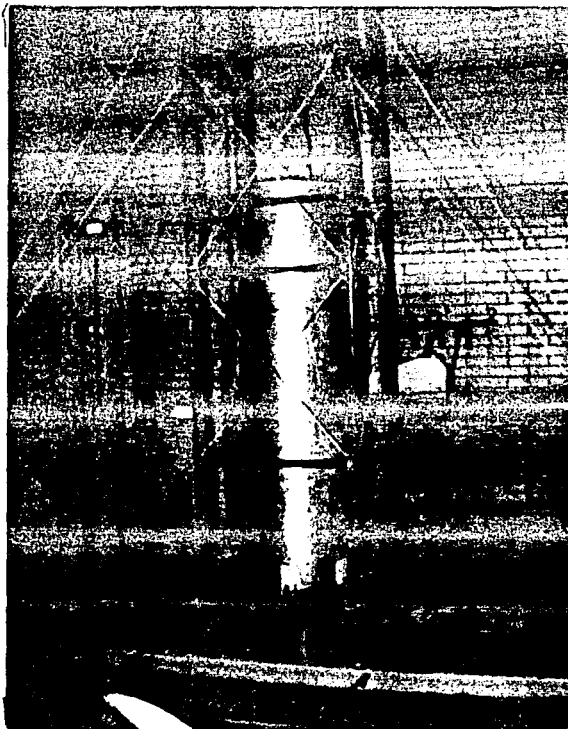
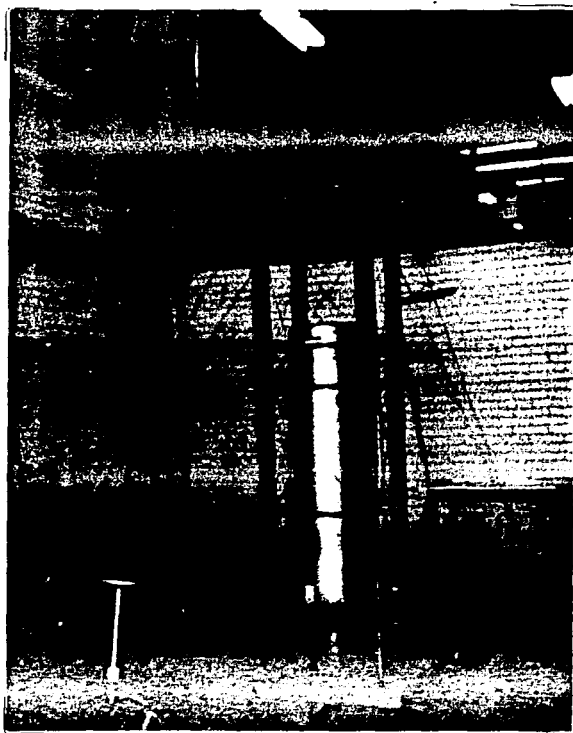
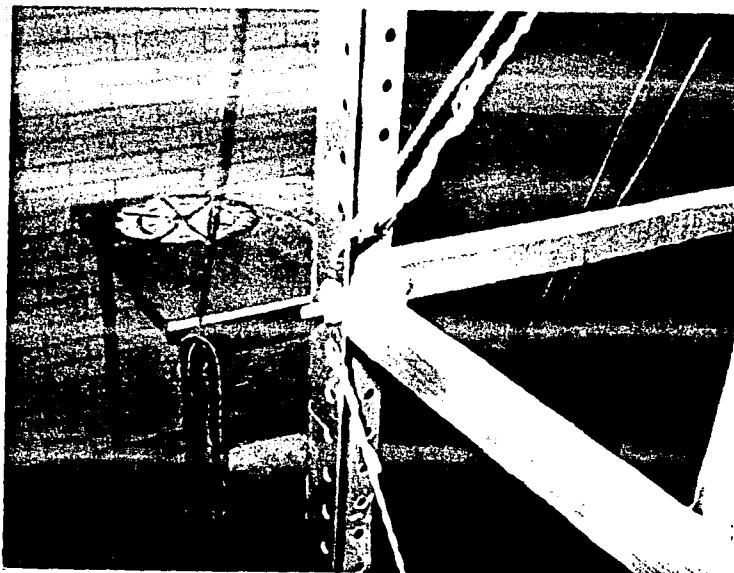


FIG. 6.45 ESTRUCTURA  
EMPLEADA PARA COLOCAR  
INSTRUMENTOS DE MEDICIÓN

FIG. 6.46 FORMA EN QUE SE  
RIGIDIZÓ LA ESTRUCTURA  
DE SOPORTE







**FIG. 6.47 DETALLE DE CONSTRUCCIÓN DE LA ESTRUCTURA DE SOPORTE**

Estas 5 condiciones se realizarón para los dos tipos de material de almacenamiento seleccionados (trigo y cebada).

Los registros que se tienen de cada prueba son mediciones de deformación del cilindro en su parte superior y obtención de la frecuencia de resonancia igualmente en la parte superior del cilindro.

Para obtener los registros de deformación, se instalarón 4 micrómetros colocados en la parte superior del cilindro, como se indica en la figura 6.48.

En la fig. 6.49 se muestra en detalle la colocación de uno de los micrómetros.

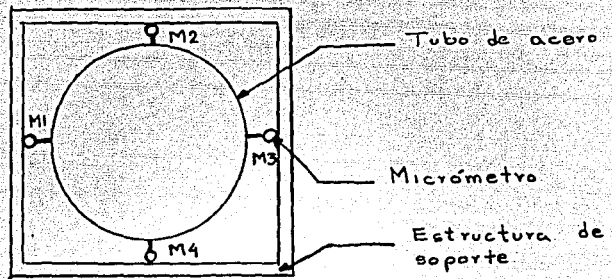


FIG. 6.48 COLOCACIÓN DE LOS MICRÓMETROS DURANTE EL DESARROLLO DE LAS PRUEBAS

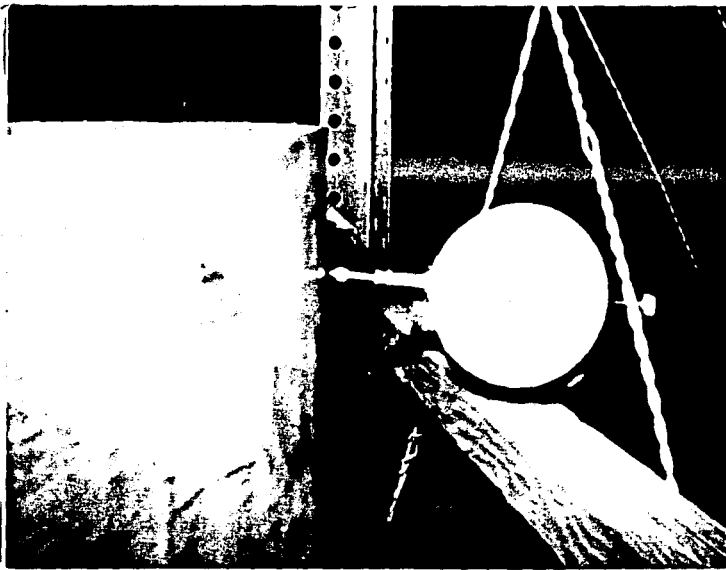


FIG. 6.49 DETALLE DE COLOCACIÓN DE LOS MICRÓMETROS

La deformación del cilindro se obtuvo al hacer la correspondiente resta de lecturas inicial y final para cada uno de los micrómetros, al iniciar y finalizar cada una de las pruebas.

En lo referente a la frecuencia de resonancia, se pudo obtener con la ayuda de un acelerómetro colocado en la parte superior del cilindro, ver fig. 6.50.

El acelerómetro es a su vez conectado a un osciloscopio en el cual se recibe la señal emitida por dicho acelerómetro, fig. 6.51.

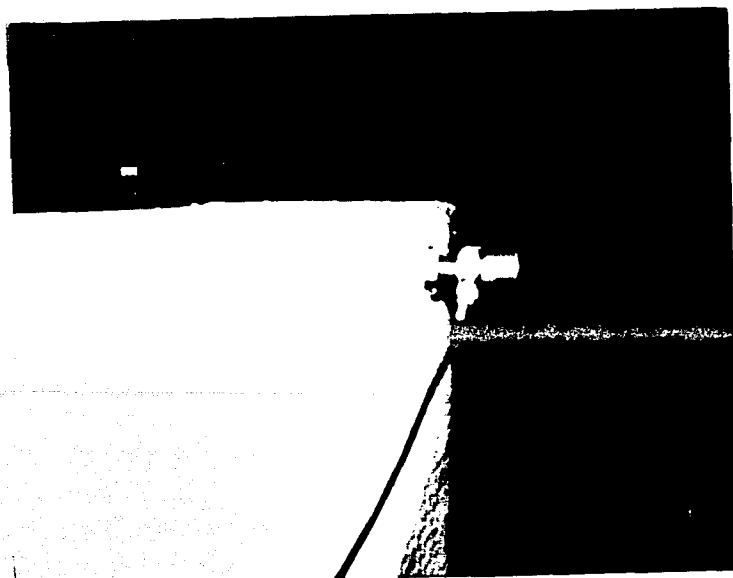


FIG. 6.50 COLOCACIÓN DEL ACELERÓMETRO EN LA PARTE SUPERIOR DEL CILINDRO

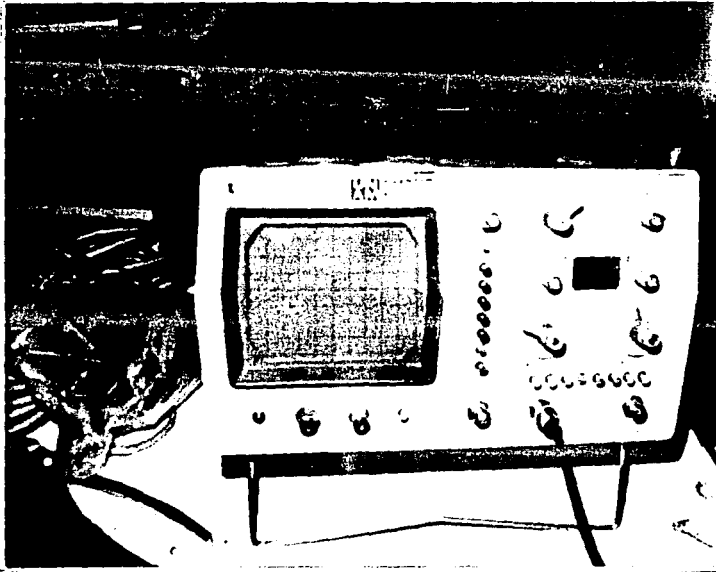


FIG. 6.51 OSCILOSCÓPIO QUE CAPTA LA SEÑAL DEL ACCELERÓMETRO

Un esquema que muestra en forma general como se obtienen los registros durante las pruebas así como las conexiones de los aparatos de medición, se indica en la fig. 6.52.

El procedimiento que se sigue para determinar la frecuencia de resonancia es como sigue

a) Con el volante que controla los desplazamientos de la mesa vibratoria, se gira de tal manera que se obtenga el máximo desplazamiento

b) El volante que controla la frecuencia de la mesa vibratoria se coloca de manera que exista un valor nulo de la frecuencia de la mesa

c) Se comienza a girar el volante que corresponde a la frecuencia de la mesa en intervalos de 5 vueltas completas de dicho volante; en cada intervalo se observa la señal que se tiene en el osciloscopio. Al incrementarse el número de vueltas del volante, se aumentará la frecuencia de la mesa vibradora, lo que ocasiona un aumento en la amplitud de la señal registrada en el osciloscopio. Al seguir aumentando la frecuencia de la mesa, existe un momento en que la señal del osciloscopio llega a un máximo y en el cual a partir de éste momento, comienza a decrecer la señal al seguirse incrementando el valor de la frecuencia de la mesa vibradora.

d) Se registra el número de vueltas para el cual la señal en el osciloscopio es máxima y con la ayuda de las gráficas de calibración de la mesa vibratoria (ver apéndice) se obtiene la correspondiente frecuencia de resonancia del cilindro

e) Otra forma menos confiable de conocer la frecuencia de resonancia del cilindro, es mediante la ayuda de los micrómetros colocados en la parte superior del cilindro.

Se puede conocer el momento en que se obtiene la frecuencia de resonancia, cuando las agujas de los micrómetros giran de una forma muy rápida y con grandes desplazamientos que se observan en la carátula del micrómetro.

Así mismo, se puede conocer esta frecuencia de resonancia al hacer una marca (que puede ser una cruz o círculos) en la superficie del material almacenado; al aumentar la frecuencia de la mesa y llegar a la frecuencia de resonancia del cilindro, éste tenderá a vibrar ocasionando se distorsione la marca señalada en la superficie del grano, lo que nos indicaría el valor de la frecuencia buscada, ver fig. 6.53.

El procedimiento anterior se repite para cada una de las pruebas con las 5 condiciones del cilindro antes especificadas, así como para los dos tipos de grano.

Una condición importante que se tuvo presente durante la realización de las pruebas, es la forma en que se llenó el tubo, con el material de almacenamiento para cada una de las diferentes condiciones antes mencionadas, ya que siempre se consiguió tener una misma altura de llenado y un mismo caudal de entrada en el tubo. Esta condición se pudo obtener al colocar en la parte superior del tubo un cono truncado que permite mantener la altura y caudal de llenado en forma constante.

Otro aspecto que se tuvo presente, fué que para cada una de las pruebas que se realizaron se vació el grano que ya se tenía almacenado al término de una prueba y volver a llenar nuevamente el tubo a la condición que se requería para la iniciación de la prueba siguiente. Lo anterior se realizó debido a que el silo al vibrar provoca un acomodo de los granos y por consiguiente compacta el material de almacenamiento ocasionando se cambie circunstancialmente las condiciones de las pruebas.

Así mismo, cada una de las pruebas se repitió varias veces, con el fin de comparar los resultados registrados de una misma prueba y poder verificar si no existen diferencias considerables en dichos registros.

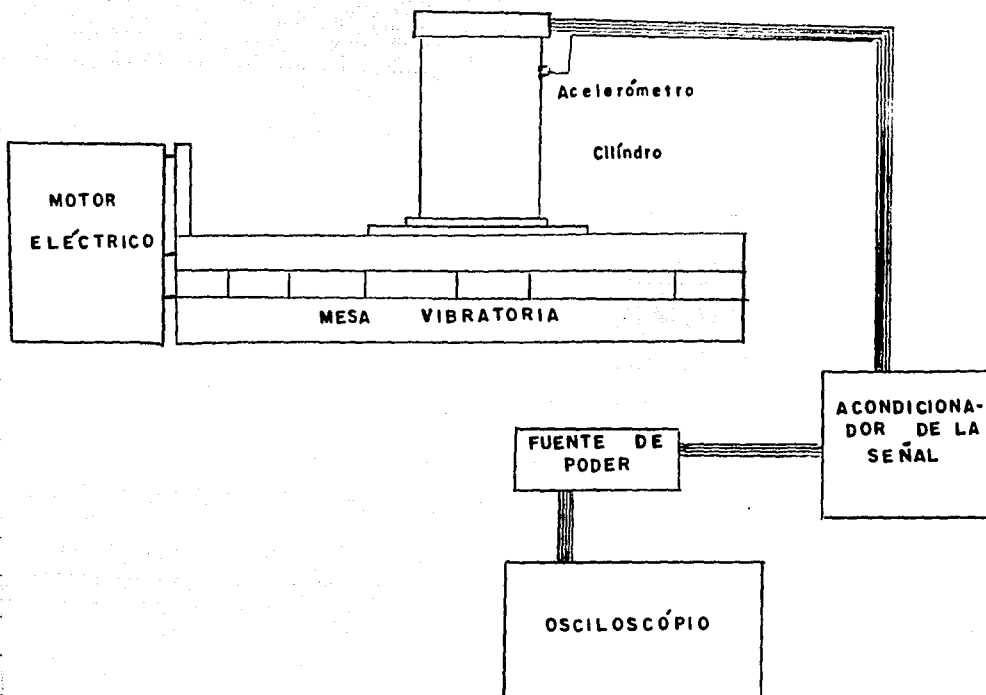


FIG. 6.52 SISTEMA DE MEDICIÓN DURANTE LAS PRUEBAS

## 2. Pruebas con el tubo de asbesto-cemento.

Las pruebas desarrolladas con el tubo de asbesto-cemento presentan el mismo procedimiento descrito en las pruebas con el tubo metálico.

En las figuras 2.54 a 2.58 se muestra la forma en que se colocó el tubo en la mesa vibratoria, en donde se aprecia que debido a su mayor masa se tuvieron mayores problemas en la forma de empotrar el tubo a la mesa.

Los análisis teóricos y los resultados que se obtuvieron de estas pruebas se presentan en el capítulo VII.

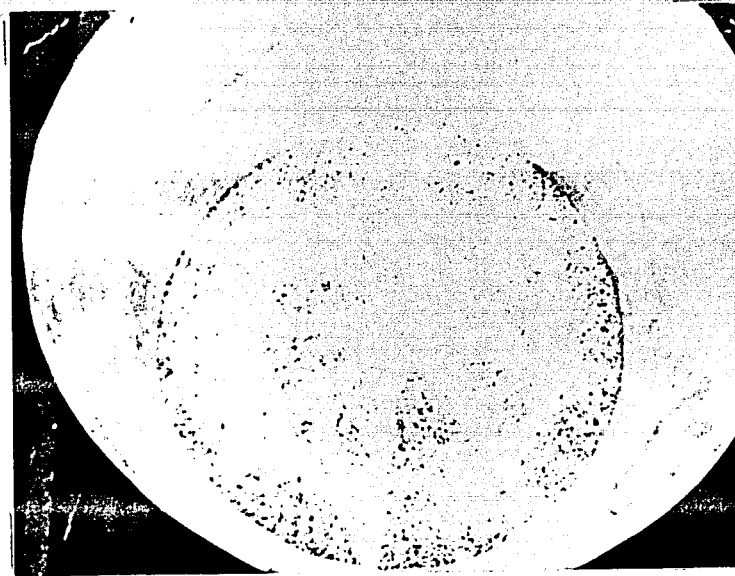


FIG. 6.53

MARCA EN LA SUPERFICIE DEL GRANO ALMACENADO  
PARA DETERMINAR LA FRECUENCIA DEL CILINDRO

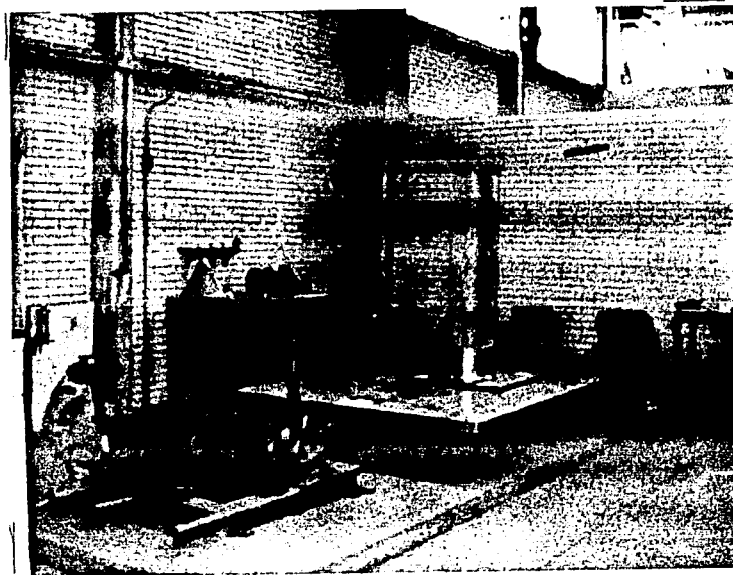


FIG 6.54

PRUEBAS DE VIBRACIÓN EMPLEANDO EL TUBO DE  
ASBESTO-CEMENTO

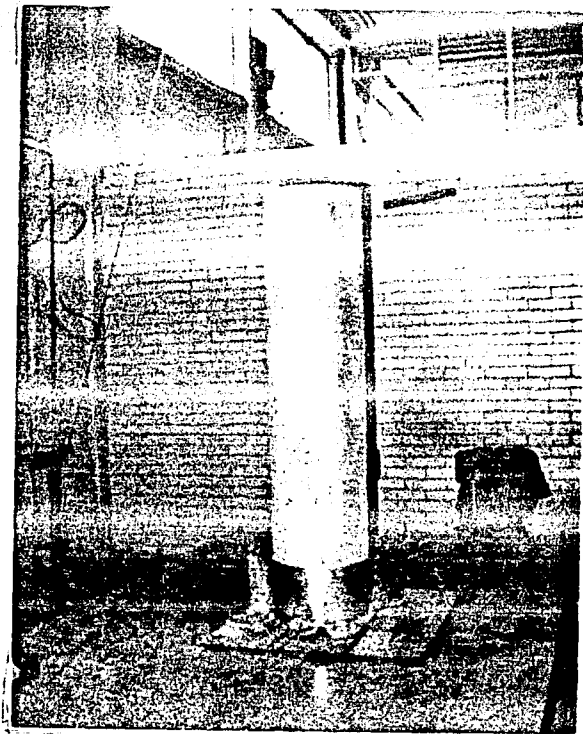


FIG. 6.55 EMPOTRAMIENTO  
DEL TUBO DE ASBESTO-CE-  
MENTO EN LA MESA  
VIBRATORIA

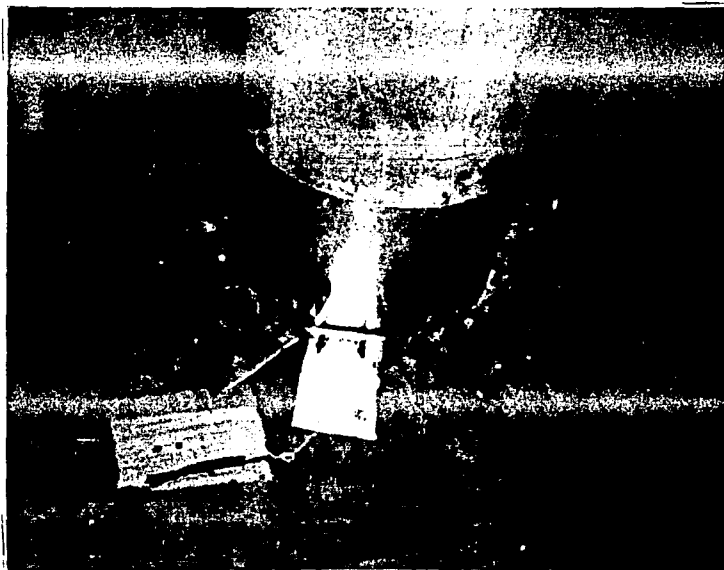


FIG. 6.56 DETALLE DEL EMPOTRAMIENTO DEL TUBO DE  
ASBESTO-CEMENTO



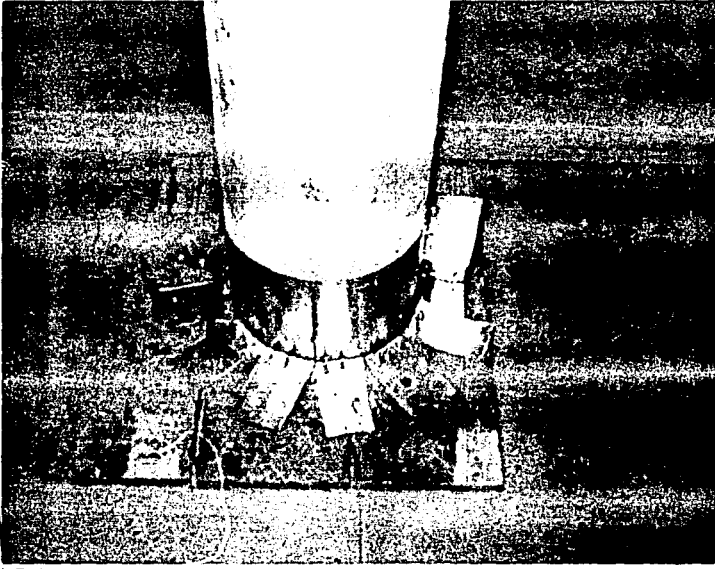


FIG. 6,57

EMPOTRAMIENTO DEL  
TUBO EN LA MESA  
VIBRATORIA



FIG. 6.58  
DETALLE DEL  
EMPOTRAMIENTO

## V I I .- R E S U L T A D O S D E L E S T U D I O E X P E R I M E N T A L

En el presente capítulo se describen los resultados obtenidos de las pruebas de vibración de silos, realizadas en la mesa vibratoria de la E.N.E.P. Aragón.

Con el propósito de hacer una comparación con los resultados experimentales obtenidos en las pruebas, se presenta en la primera parte de éste capítulo los resultados de un análisis teórico que se desarrolló para obtener el valor de la frecuencia de vibración de cada uno de los dos tipos de tubos utilizados en las pruebas de vibración. El análisis mencionado se describe a continuación :

Se calculó el valor de la frecuencia de la estructura para un primer modo de vibración en la cual se consideró tres diferentes formas de comportamiento de la estructura (tanto para el tubo de lámina de acero como para el tubo de asbesto-cemento).

1. Comportamiento de la estructura en la cual sólo se consideró el efecto de la flexión pura. Para este tipo de comportamiento, en cada uno de los dos tubos se consideró las siguientes alternativas :

- 1° Alter. Tubo lleno de cebada
- 2° Alter. Tubo lleno de trigo
- 3° Alter. Considerando al tubo vacío

2. Comportamiento de la estructura tomando en cuenta vibración extensional (esfuerzo de membrana).

Para este caso se tienen las siguientes alternativas :

a) Considerando un valor de la onda longitudinal igual a la altura del tubo.

- 1° Alter. Tubo lleno de cebada
- 2° Alter. Tubo lleno de trigo
- 3° Alter. Considerando al tubo vacío

b) Considerando un valor de la onda senoidal igual a dos veces la altura del tubo :

- 1° Alter. Tubo lleno de cebada
- 2° Alter. Tubo lleno de trigo
- 3° Alter. Considerando al tubo vacío

3.- Comportamiento de la estructura tomando en cuenta vibración inextensional.

a) Considerando deformación sólo en dos direcciones.

1° Alter. Tubo lleno de cebada

2° Alter. Tubo lleno de trigo

3° Alter. Considerando al tubo vacío

b) Considerando deformación en tres direcciones.

i) Para un valor de la onda longitudinal igual a la altura del tubo :

1° Alter. Tubo lleno de cebada

2° Alter. Tubo lleno de trigo

3° Alter. Considerando al tubo vacío

ii) Para un valor de la onda longitudinal igual a dos veces la altura del tubo :

1° Alter. Tubo lleno de cebada

2° Alter. Tubo lleno de trigo

3° Alter. Considerando al tubo vacío

Los cálculos correspondientes al análisis teórico descrito, se presenta a continuación, en donde solo se muestran algunos de los casos, ya que más adelante se hace un resumen de estos:

## I.- Tubo de acero

1) Cálculo de la frecuencia considerando flexión

$$\omega_n = \frac{\lambda n^2}{l^2} \sqrt{\frac{EI}{M}}$$

donde:

$$\lambda = 1.8751$$

 $n = 1$  (solo se considera el 1° modo de vibrar)

$$E = 2.03 \times 10^6 \text{ Kg/cm}^2$$

$$M = m/g$$

$$g = 978 \text{ cm/seg}^2$$

Las dimensiones del tubo son:

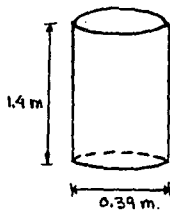
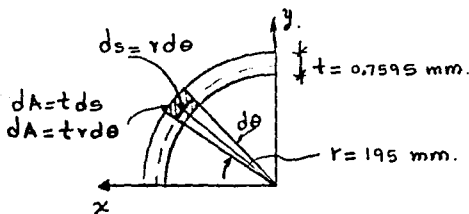


Lámina calibre 22

Espesor = 0.7595 mm

Cálculo del área y momento de inercia:

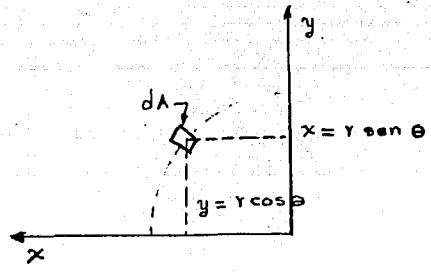


$$A = \int dA = \int_{\pi/2}^{\pi} t r d\theta$$

$$A = \int_{\pi/2}^{\pi} t r d\theta = t r \int_{\pi/2}^{\pi} d\theta = t r [\theta_2 - \theta_1]_{\pi/2}^{\pi} = t r [\pi - \pi/2]$$

$$A = t r [\pi/2] = (0.7595 \text{ mm})(195 \text{ mm})(\pi/2) = 232.64 \text{ mm}^2$$

$$A_{\text{total}} = (232.64)(4) = 930.55 \text{ mm}^2$$



$$I_x = I_y = \int y^2 dA = \int (r \cos \theta)^2 t r d\theta = r^3 t \int \cos^2 \theta d\theta$$

$$I_x = r^3 t \left[ \frac{\theta}{2} + \frac{1}{4} \sin 2\theta \right]_{\pi/2}^{\pi} = r^3 t \left[ \frac{\pi}{2} + \frac{1}{4} \sin 2\pi - \frac{\pi}{4} - \frac{1}{4} \sin \pi \right]$$

$$I_x = (195 \text{ mm})^3 (0.7595 \text{ mm}) (\pi/4) = 4\,423\,046 \text{ mm}^4$$

$$I_{\text{total}} = (4\,423\,046)(4) = 17\,692\,185 \text{ mm}^4$$

Se comprueban los resultados anteriores como:

$$A_1 = \frac{(\pi)(390 \text{ mm} + 2 \times 0.7595 \text{ mm})^2}{4} = 120\,391 \text{ mm}^2$$

$$A_2 = \frac{(\pi)(390 \text{ mm})^2}{4} = 119\,459 \text{ mm}^2$$

$$A_{\text{neto}} = 120\,391 - 119\,459 = 932.37 \text{ mm}^2 \approx 930.56 \text{ mm}^2$$

$$I_1 = \frac{(\pi)(195 + 0.7595)^4}{4} = 1153\,403\,513 \text{ mm}^4$$

$$I_2 = \frac{(\pi)(195 \text{ mm})^4}{4} = 1135\,607\,695 \text{ mm}^4$$

$$I_{\text{total}} = 1153\,403\,513 - 1135\,607\,695 = 17\,795\,817 \text{ mm}^4 \approx 17\,692\,185 \text{ mm}^4$$

i) Pruebas con cebada como material de almacenamiento.

$$\gamma_{\text{cebada}} \approx 600 \text{ Kg/m}^3$$

calculando el valor de m:



$$m_{\text{grano}} = [600 \text{ Kg/m}^3] \left[ \frac{(\pi)(0.39 \text{ m})^2}{4} \right] = 71.675 \text{ Kg/m} = 0.71675 \text{ Kg/cm}$$

$$m_{\text{tubo}} = [(\pi)(39 \text{ cm})] [0.00061030 \text{ Kg/cm}^2] = 0.074775 \text{ Kg/cm}$$

$$M_{\text{total}} = 0.71675 + 0.074775 = 0.7915 \text{ Kg/cm}$$

$$\mathcal{M} = \frac{m}{g} = \frac{0.7915 \text{ Kg/cm}}{978 \text{ cm/seg}^2} = 0.00080933 \frac{\text{Kg} \cdot \text{seg}^2}{\text{cm}^2}$$

$$EI = (2.03 \times 10^6 \text{ Kg/cm}^2)(1769.2185 \text{ cm}^4) = 3.591513 \times 10^7 \text{ Kg} \cdot \text{cm}^2$$

$$\frac{EI}{\mathcal{M}} = \frac{3.591513 \times 10^7 \text{ Kg} \cdot \text{cm}^2}{0.00080933 \frac{\text{Kg} \cdot \text{seg}^2}{\text{cm}^2}} = 4.4376352 \times 10^{12} \text{ cm/seg}^2$$

empleando la fórmula de frecuencia:

$$\omega_1 = \frac{(1.875)(1)^2}{(140 \text{ cm})^2} \sqrt{4.4376352 \times 10^{12} \frac{\text{cm}^4}{\text{seg}^2}} = 201.932 \frac{\text{rad}}{\text{seg}}$$

$$\omega_1 = 32.07 \frac{\text{ciclos}}{\text{seg.}}$$

ii) Pruebas con trigo como material de almacenamiento

$$\delta_{\text{trigo}} = 765 \text{ Kg/m}^3$$

$$M_{\text{grano}} = [765 \text{ Kg/m}^3] \left[ \frac{\pi(0.39 \text{ m})^2}{4} \right] = 91.386 \text{ Kg/m} = 0.91386 \text{ Kg/cm.}$$

$$M_{\text{tub}} = 0.074775 \text{ Kg/cm.}$$

$$M_{\text{total}} = 0.91386 + 0.074775 = 0.988637 \text{ Kg/cm.}$$

$$\mathcal{M} = \frac{0.988637 \text{ Kg/cm}}{978 \text{ cm/seg}^2} = 0.001010876 \frac{\text{Kg} \cdot \text{seg}^2}{\text{cm}^2}$$

$$\frac{EI}{\mathcal{M}} = \frac{3.5915136 \times 10^7 \text{ Kg} \cdot \text{cm}^2}{0.001010876 \frac{\text{Kg} \cdot \text{seg}^2}{\text{cm}^2}} = 3.5528722 \times 10^{12} \frac{\text{cm}^4}{\text{seg}^2}$$

$$\omega_1 = \frac{(1.875)(1)^2}{(140 \text{ cm})^2} \sqrt{3.5528722 \times 10^{12} \frac{\text{cm}^4}{\text{seg}^2}} = 180.325 \frac{\text{rad}}{\text{seg.}}$$

$$\omega_1 = 28.699 \frac{\text{ciclos}}{\text{seg.}}$$

iii) Considerando el tubo vacío:

$$M_{\text{tubo}} = 0.074775 \text{ Kg/cm}$$

$$M = \frac{0.074775 \text{ Kg/cm}}{978 \text{ cm/seg}^2} = 0.000076457 \frac{\text{Kg} \cdot \text{seg}^2}{\text{cm}^2}$$

$$EI = 4.70904 \times 10^{10} \text{ Kg} \cdot \text{cm}^2$$

$$\frac{EI}{M} = \frac{4.70904 \times 10^{10} \text{ Kg} \cdot \text{cm}^2}{0.000076457 \frac{\text{Kg} \cdot \text{seg}^2}{\text{cm}^2}} = 6.159 \times 10^{14} \text{ cm}^4/\text{seg}^2$$

$$\omega_1 = \frac{1.8751}{(140 \text{ cm})^2} \sqrt{6.159 \times 10^{14} \text{ cm}^4/\text{seg}^2} = 2374.25 \frac{\text{rad}}{\text{seg}}$$

$$\omega_1 = 377.873 \frac{\text{ciclos}}{\text{seg}}$$

2) Cálculo de la frecuencia considerando vibración Extensional.  
Se calcula el parámetro de frecuencia con la sig. ecuación:

$$\left( \lambda^2 - \frac{\pi^2 a^2}{L^2} + n^2 \right) \left\{ (1-\nu) \lambda^2 \left[ \lambda^2 - 2(1-\nu) \left( \frac{\pi^2 a^2}{L^2} + n^2 + 1 \right) \right] + (1+\nu) \frac{4\pi^2 a^2}{L^2} \right\} + (1+\nu) \frac{4\pi^2 a^4 n^2}{L^2} = 0$$

donde:

$\lambda$  = Parámetro de frecuencia.

$a$  = Radio medio del tanque cilíndrico. = 19.5 cm

$L$  = Longitud de la onda longitudinal = 140 cm

$n$  = número de onda circunferencial completa = 1

$\nu$  = Modulo de poisson = 0.3.

sustituyendo valores:

$$\left( \lambda^2 - \frac{(\pi^2)(19.5 \text{ cm})^2}{(140 \text{ cm})^2} + (1)^2 \right) \left\{ (1-0.3) \lambda^2 \left[ \lambda^2 - 2(1-0.3) \left( \frac{\pi^2 (19.5 \text{ cm})^2}{(140 \text{ cm})^2} + (1)^2 + 1 \right) \right] + (1+0.3) \frac{(4)(\pi^2)(19.5 \text{ cm})^2}{(140 \text{ cm})^2} \right\} + (1+0.3) \frac{(4)(\pi^2)(19.5 \text{ cm})^2 (1)^2}{(140 \text{ cm})^2} = 0$$

$$\left( \lambda^2 + 0.809 \right) \left\{ 0.7 \lambda^2 \left[ \lambda^2 - 3.068 \right] + 0.996 \right\} + 0.996 = 0$$

$$\left( \lambda^2 + 0.809 \right) \left\{ 0.7 \lambda^4 - 2.148 \lambda^2 + 0.996 \right\} + 0.996 = 0$$

$$0.7 \lambda^6 - 1.582 \lambda^4 - 0.772 \lambda^2 + 1.802 = 0$$

Se obtienen las 6 raíces de la ecuación:

$$\lambda_1 = 1.49635$$

$$\lambda_2 = -1.49635$$

$$\lambda_3 = 1.04056 \quad (\text{corresponde al 1}^\circ \text{ modo})$$

$$\lambda_4 = -1.04056$$

$$\lambda_5 = 1.03045j$$

$$\lambda_6 = -1.03045j$$

Se aplica la ecuación de frecuencia

$$\text{donde } \omega = \frac{\lambda}{a} \sqrt{\frac{Gh}{\mu}}$$

$$\lambda = 1.04056$$

$$a = 19.5 \text{ cm}$$

$$G = \frac{E}{2(1+\nu)} = \frac{2.03 \times 10^6 \text{ kg/cm}^2}{2(1+0.3)} = 7807692 \text{ kg/cm}^2$$

i) Pruebas con cebada como material de almacenamiento.

$$m = 0.7915 \text{ kg/cm}$$

$$\mu = \frac{0.7915 \text{ kg/cm}}{978 \text{ cm/seg}^2} = 0.00080933 \frac{\text{kg} \cdot \text{seg}^2}{\text{cm}^2} / \text{cm}$$

$$\omega = \frac{1.04056}{19.5 \text{ cm}} \sqrt{\frac{(7807692 \text{ kg/cm}^2)(0.07595 \text{ cm})}{0.00080933 \frac{\text{kg} \cdot \text{seg}^2}{\text{cm}^2} / \text{cm}}} = 1444.42 \frac{\text{rad}}{\text{seg}}$$

$$\boxed{\omega = 229 \frac{\text{ciclos}}{\text{seg}}}$$

ii) Pruebas con trigo como material de almacenamiento

$$\mu = 0.001010876 \frac{\text{kg} \cdot \text{seg}^2}{\text{cm}^2} / \text{cm}$$

$$\omega_1 = \frac{1.04056}{19.5 \text{ cm}} \sqrt{\frac{(7807692 \text{ kg/cm}^2)(0.07595 \text{ cm})}{0.001010876 \frac{\text{kg} \cdot \text{seg}^2}{\text{cm}^2} / \text{cm}}} = 1292.43 \frac{\text{rad}}{\text{seg}}$$

$$\boxed{\omega_1 = 205.69 \frac{\text{ciclos}}{\text{seg}}}$$

iii) Considerando el tubo vacío.

$$\mu = 0.000076457 \frac{\text{kg} \cdot \text{seg}^2}{\text{cm}^2} / \text{cm}$$

$$\omega_1 = \frac{1.04056}{19.5 \text{ cm}} \sqrt{\frac{(7807692 \text{ kg/cm}^2)(0.07595 \text{ cm})}{0.000076457 \frac{\text{kg} \cdot \text{seg}^2}{\text{cm}^2} / \text{cm}}} = 4699.47 \frac{\text{rad}}{\text{seg}}$$

$$\boxed{\omega_1 = 747.94 \frac{\text{ciclos}}{\text{seg}}}$$



- Con un valor de  $L = 280 \text{ cm}$

$$\left( \lambda^2 - \frac{(\pi^2)(19.5 \text{ cm})^2}{(280 \text{ cm})^2} + (1)^2 \right) \left\{ (1-0.3) \lambda^2 \left[ \lambda^2 - 2(1-0.3) \left( \frac{\pi^2 (19.5 \text{ cm})^2}{(280 \text{ cm})^2} + (1)^2 + 1 \right) \right] \right\} + (1+0.3) \frac{(4) \pi^2 (19.5 \text{ cm})^2 (1)^2}{(280 \text{ cm})^2} + (1+0.3) \frac{4 \pi^2 (19.5 \text{ cm})^2 (1)^2}{(280 \text{ cm})^2} = 0$$

$$(\lambda^2 + 0.952) \left\{ 0.7 \lambda^2 [\lambda^2 - 2.867] + 0.249 \right\} + 0.249 = 0$$

$$(\lambda^2 + 0.952) \left\{ 0.7 \lambda^4 - 2.007 \lambda^2 + 0.249 \right\} + 0.249 = 0$$

$$0.7 \lambda^6 - 2.007 \lambda^4 + 0.249 \lambda^2 + 0.666 \lambda^4 - 1.911 \lambda^2 + 0.237 + 0.249 = 0$$

$$0.7 \lambda^6 - 1.341 \lambda^4 - 1.662 \lambda^2 + 0.486 = 0$$

Obteniendo las 6 raíces de la ecuación:

$$\lambda_1 = 1.64313$$

$$\lambda_2 = -1.64313$$

$$\lambda_3 = 0.498919$$

$$\lambda_4 = -0.498919$$

$$\lambda_5 = 1.01640 i$$

$$\lambda_6 = -1.01640 i$$

Se aplica la ecuación donde:

$$\lambda = 0.498919$$

$$G = 7807692 \text{ kg/cm}^2$$

$$a = 19.5 \text{ cm.}$$

$$h = 0.07595 \text{ cm.}$$

i) Pruebas con cebada como material de almacenamiento:

$$\mu = 0.00080933 \text{ Kg} \cdot \text{seg}^2 / \text{cm}^2 / \text{cm}$$

$$\omega_1 = \frac{0.498919}{19.5 \text{ cm}} \sqrt{\frac{(7807692 \text{ Kg/cm}^2)(0.07595 \text{ cm})}{0.00080933 \frac{\text{Kg} \cdot \text{seg}^2}{\text{cm}}}} = 692.56 \frac{\text{rad}}{\text{seg.}}$$

$$\omega_1 = 110.22 \frac{\text{ciclos}}{\text{seg.}}$$

ii) Pruebas con trigo como material de almacenamiento:

$$\mu = 0.001010876 \frac{\text{Kg} \cdot \text{seg}^2}{\text{cm}^2} / \text{cm.}$$

$$\omega_1 = \frac{0.498919}{19.5 \text{ cm}} \sqrt{\frac{(7807692 \text{ Kg/cm}^2)(0.07595 \text{ cm})}{0.001010876 \frac{\text{Kg} \cdot \text{seg}^2}{\text{cm}}}} = 619.68 \frac{\text{rad}}{\text{seg.}}$$

$$\omega_1 = 98.6 \frac{\text{ciclos}}{\text{seg.}}$$

iii) Considerando al tubo vacío.

$$\mu = 0.000076497 \frac{\text{Kg} \cdot \text{seg}^2}{\text{cm}^2} / \text{cm.}$$

$$\omega_1 = \frac{0.498919}{19.5 \text{ cm}} \sqrt{\frac{(7807692 \text{ Kg/cm}^2)(0.07595 \text{ cm})}{0.000076497 \frac{\text{Kg} \cdot \text{seg}^2}{\text{cm}}}} = 2253 \frac{\text{rad}}{\text{seg.}}$$

$$\omega = 358.6 \frac{\text{ciclos}}{\text{seg.}}$$

3) Cálculo de la frecuencia considerando vibración inextensional:

a) Con desplazamiento en dos direcciones

$$\omega_n^2 = \frac{E h^3}{12 (1-\nu)^2 M a^4} \frac{n^2 (n^2 - 1)^2}{n^2 + 1}$$

i) Pruebas con cebada como material de almacenamiento

$$E = 2.03 \times 10^6 \text{ Kg/cm}^2$$

$$h = 0.07595 \text{ cm}$$

$$n = 2$$

$$\nu = 0.3$$

$$M = 0.00080933 \frac{\text{Kg} \cdot \text{seg}^2}{\text{cm}^2} / \text{cm}$$

$$a = 19.5$$

$$\omega_1^2 = \frac{(2.03 \times 10^6 \text{ Kg/cm}^2)(0.07595 \text{ cm})^3}{12 (1-0.3)^2 (0.00080933 \frac{\text{Kg} \cdot \text{seg}^2}{\text{cm}^2})(19.5 \text{ cm})^4} \cdot \frac{(2)^2 (2^2 - 1)^2}{2^2 + 1}$$

$$\omega^2 = 9.30616 \quad \therefore \omega = 3.05060 \frac{\text{rad}}{\text{seg}}$$

$$\boxed{\omega = 0.48552 \frac{\text{ciclos}}{\text{seg}}}$$

ii) Pruebas con trigo como material de almacenamiento.

$$M = 0.001010876 \frac{\text{Kg} \cdot \text{seg}^2}{\text{cm}^2} / \text{cm}$$

$$\omega^2 = \frac{(2.03 \times 10^6 \text{ Kg/cm}^2)(0.07595 \text{ cm})^3}{12 (1-0.3)^2 (0.001010876 \frac{\text{Kg} \cdot \text{seg}^2}{\text{cm}^2})(19.5 \text{ cm})^4} \cdot \frac{(2)^2 (2^2 - 1)^2}{2^2 + 1}$$

$$\omega^2 = 7.39306 \quad \therefore \omega = 2.71902 \frac{\text{rad}}{\text{seg}}$$

$$\boxed{\omega = 0.43275 \frac{\text{ciclos}}{\text{seg}}}$$

iii) Considerando al tubo vacío.

$$\mu = 0.000076457 \frac{\text{kg} \cdot \text{seg}^2}{\text{cm}^2} / \text{cm}$$

$$\omega_n^2 = \frac{(2.03 \times 10^6 \text{ kg/cm}^2)(0.07595 \text{ cm})^3}{12(1-0.3)^2(0.000076457 \frac{\text{kg} \cdot \text{seg}^2}{\text{cm}^2})(19.5 \text{ cm})^4} \cdot \frac{(2)^2(2^2-1)^2}{2^2+1}$$

$$\omega_n^2 = 98.809 \quad \therefore \omega = 9.925 \frac{\text{rad}}{\text{seg}}$$

$$\omega = 1.57965 \frac{\text{ciclos}}{\text{seg.}}$$

b) Considerando desplazamiento en 3 direcciones.

$$\omega_n^2 = \frac{Eh^3}{12(1-\nu)^2 \mu a^4} \cdot \frac{n^2(n^2-1)^2}{n^2+1} \cdot \frac{1+(1-\nu)6a^2/n^2 l^2}{1+3a^2/(n^2+n^2)l^2}$$

i) Pruebas con cebada como material de almacenamiento

$$-L = 140 \text{ cm}$$

$$\omega_n^2 = \frac{(2.03 \times 10^6 \text{ kg/cm}^2)(0.07595 \text{ cm})^3}{12(1-0.3)^2(0.00080933 \frac{\text{kg} \cdot \text{seg}^2}{\text{cm}^2})(19.5 \text{ cm})^4} \cdot \frac{(2)^2(2^2-1)^2}{2^2+1} \cdot \frac{1+(1-0.3)(6)(19.5 \text{ cm})^2/(2)^2(140 \text{ cm})^2}{1+(3)(19.5 \text{ cm})^2/((2)^2+(2)^2)(140 \text{ cm})^2}$$

$$\omega_n^2 = 9.32641 \quad \therefore \omega = 3.05392 \frac{\text{rad}}{\text{seg.}}$$

$$\omega = 0.48605 \frac{\text{ciclos}}{\text{seg.}}$$

$$-L = 280 \text{ cm}$$

$$\omega_n^2 = (9.30161) \cdot \frac{1+(1-0.3)(6)(19.5 \text{ cm})^2/(2)^2(280 \text{ cm})^2}{1+(3)(19.5 \text{ cm})^2/(2^2+2^2)(280 \text{ cm})^2}$$

$$\omega_n^2 = 9.34675 \quad \therefore \omega = 3.05725 \frac{\text{rad}}{\text{seg.}}$$

$$\omega = 0.48658 \frac{\text{ciclos}}{\text{seg.}}$$

ii) Pruebas con trigo como material de almacenamiento.

$$- L = 140 \text{ cm}$$

$$\omega^2 = (7.39306)(1.01741) = 7.52177 \quad \therefore \omega = 2.74268 \frac{\text{rad}}{\text{seg.}}$$

$$\omega = 0.4365 \frac{\text{ciclos}}{\text{seg.}}$$

$$- L = 280 \text{ cm.}$$

$$\omega^2 = (7.39306)(1.00436) = 7.42531 \quad \therefore \omega = 2.72494 \frac{\text{rad}}{\text{seg.}}$$

$$\omega = 0.43369 \frac{\text{ciclos}}{\text{seg.}}$$

iii) Considerando tubo vacío.

$$- L = 140 \text{ cm}$$

$$\omega_1^2 = (98.509)(1.01741) = 100.224 \quad \therefore \omega = 10.01 \frac{\text{rad}}{\text{seg}}$$

$$\omega = 1.5933 \frac{\text{ciclos}}{\text{seg}}$$

$$- L = 280 \text{ cm.}$$

$$\omega_1^2 = (98.509)(1.00436) = 98.9385 \quad \therefore \omega = 9.94678 \frac{\text{rad}}{\text{seg}}$$

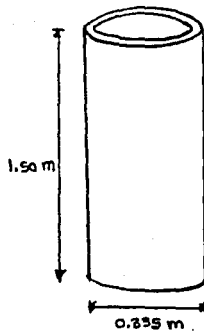
$$\omega = 1.58308 \frac{\text{ciclos}}{\text{seg.}}$$

## II.- Tubo de asbesto - cemento

Se realizan los mismos calculos que para el caso del tubo de acero.

Para este caso solo se presentan sus propiedades ya que en una tabla posterior se hace un resumen de estos calculos.

Las dimensiones del tubo son:



Espesor de la pared del tubo = 0.02 mts.

Una vez obtenidas las frecuencias de vibración en forma analítica, en lo que sigue se presentan los resultados obtenidos de las pruebas experimentales.

El procedimiento descrito en el capítulo anterior, para obtener el valor de las frecuencias de resonancia en el tubo, para cada una de las diferentes condiciones que se tuvieron, se realizó en tres ocasiones. El propósito de haber realizado tres veces cada una de las pruebas, fué el de poder obtener un valor promedio que representara el valor real de las tres lecturas de una misma prueba y de esta forma tener datos más confiables de la respuesta del tubo para cada una de las diferentes condiciones que se estudiaron.

Los registros de las pruebas obtenidos, así como sus correspondientes promedios se muestran en la tabla 7-I y 7-II para el tubo de lámina de acero y de asbesto-cemento respectivamente.

Estos registros obtenidos corresponden a los valores de la amplitud máxima (en cm) de la respuesta de aceleración emitida por el acelerómetro colocado en la parte superior del tubo.

De los valores promedios calculados en las tablas 7-I y 7-II, se trazaron las gráficas que se presentan en las fig. 7.1 y 7.2.

En dichas gráficas el eje de las abscisas corresponde el valor del número de vueltas que se le proporciona al volante de control de frecuencia de la mesa vibratoria y el correspondiente eje de las ordenadas se tiene el valor de la amplitud registrada.

Tabla 7-1 Tubo de Lámina de Acero

Material Almacenamiento	Altura de Llenado	No de Registro	No Vueltas Volante Frecuencia				
			10	20	25	30	35
C E B A D A	Vacío	1	3.50	5.25	4.75	6.25	9.75
		2	4.50	6.25	5.25	9.75	12.25
		3	3.75	6.50	5.70	9.25	13.50
		promedio	3.92	6.00	5.23	8.42	11.83
	1/4 h	1	1.75	3.25	2.50	3.75	7.75
		2	1.50	2.25	2.00	3.50	6.25
		3	2.00	2.50	2.50	3.75	5.50
		promedio	1.75	2.67	2.33	3.67	6.50
	1/2 h	1	1.50	2.50	2.50	3.25	7.00
		2	1.75	3.00	2.50	4.00	5.00
		3	1.50	2.25	2.50	4.00	6.00
		promedio	1.58	2.58	2.50	3.75	6.00
	3/4 h	1	1.25	2.50	2.50	4.00	5.50
		2	1.50	2.50	2.25	3.75	6.25
		3	1.25	2.00	2.00	3.50	5.00
		promedio	1.33	2.33	2.25	3.75	5.58
	h	1	1.00	2.50	2.00	3.25	5.25
		2	1.00	2.00	2.00	3.00	5.00
3		1.00	1.75	1.75	2.45	4.50	
promedio		1.00	2.08	1.92	3.00	4.92	
T R I G O	Vacío	1	3.50	6.75	5.25	7.75	11.25
		2	2.50	4.25	3.50	6.75	11.25
		3	3.75	3.25	3.00	4.25	7.25
		promedio	3.25	4.75	3.92	6.25	9.92
	1/4 h	1	1.50	2.75	2.25	4.00	6.75
		2	1.25	3.00	2.50	3.75	6.25
		3	1.00	1.75	1.75	2.50	3.75
		promedio	1.25	2.50	2.17	3.42	5.58
	1/2 h	1	1.75	3.00	2.50	4.50	7.50
		2	2.00	3.00	2.25	4.00	8.50
		3	1.75	1.75	2.50	2.50	5.50
		promedio	1.83	2.58	2.42	3.67	7.17
	3/4 h	1	1.25	2.00	1.75	3.00	6.25
		2	1.25	2.50	1.50	3.50	7.00
		3	1.00	1.00	1.25	3.00	4.75
		promedio	1.17	1.83	1.50	3.17	6.00
	h	1	1.00	1.00	1.50	2.25	5.75
		2	1.00	2.00	1.50	3.25	7.50
3		1.00	1.00	1.00	1.75	3.25	
promedio		1.00	1.33	1.33	2.42	5.50	

Nota: las lecturas de los registros es en cm.



Tabla 7-II Tubo de Asbesto - Cemento

Material de Almacenamiento	Altura de llenado del tubo	No de registro	No Vueltas Volante Frecuencia				
			10	20	25	30	35
C	Vacío	1	0.70	1.10	1.40	3.00	5.00
		2	0.80	1.60	2.20	4.00	7.10
		3	0.70	1.10	1.60	3.40	5.20
		promedio	0.73	1.27	1.73	3.47	5.17
E	1/4 h	1	0.70	1.10	1.40	2.80	5.50
		2	0.80	1.50	2.30	4.50	7.20
		3	0.70	1.20	1.60	3.20	6.60
		promedio	0.73	1.27	1.77	3.50	6.43
B	1/2 h	1	0.50	0.90	1.20	2.50	5.20
		2	0.90	1.60	2.30	4.10	6.40
		3	0.70	1.20	2.00	3.50	6.20
		promedio	0.70	1.23	1.83	3.37	5.93
A	3/4 h	1	0.70	1.10	1.60	3.00	5.20
		2	0.90	1.20	2.00	4.50	7.20
		3	0.60	1.00	1.40	2.80	5.60
		promedio	0.73	1.10	1.67	3.43	6.00
D	h	1	0.60	1.20	1.50	4.20	7.60
		2	0.80	1.40	2.40	3.90	6.80
		3	0.60	1.10	1.60	2.80	6.40
		promedio	0.67	1.23	1.83	3.63	6.93
T R I G O	Vacío	1	0.70	1.40	2.40	3.60	7.00
		2	0.60	1.10	2.10	3.50	7.40
		3	0.40	1.10	1.80	2.90	6.50
		promedio	0.57	1.20	2.10	3.33	6.97
	1/4 h	1	0.70	1.20	1.80	3.30	6.60
		2	0.50	1.10	2.00	3.40	7.60
		3	0.50	0.90	1.40	2.60	5.30
		promedio	0.57	1.07	1.73	3.10	6.50
	1/2 h	1	0.60	1.20	1.90	3.40	7.40
		2	0.50	1.20	2.10	3.80	7.10
		3	0.50	0.90	1.60	2.80	6.10
		promedio	0.53	1.10	1.87	3.33	6.87
	3/4 h	1	0.60	1.20	2.00	3.60	6.80
		2	0.60	1.20	1.90	4.00	7.10
		3	0.60	1.10	1.60	3.00	6.20
		promedio	0.60	1.17	1.83	3.53	6.70
	h	1	0.50	1.10	1.80	3.10	6.90
		2	0.40	0.90	1.40	2.80	7.10
		3	0.60	1.10	1.80	3.00	6.60
		promedio	0.50	1.03	1.67	2.97	6.87

Nota : las lecturas de los registros es en cm.

FIG. 7.1 TUBO DE LAMINA DE ACERO

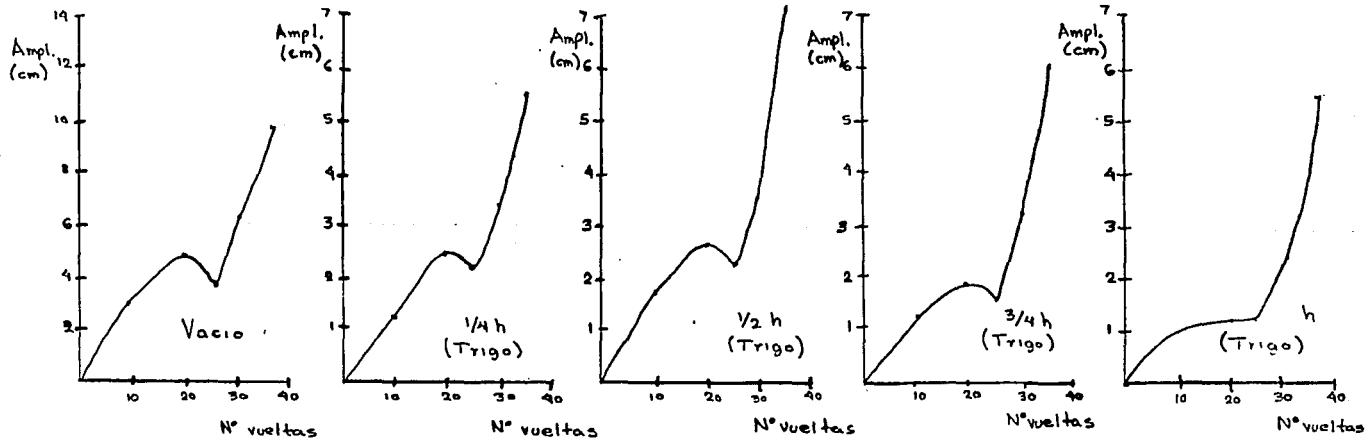
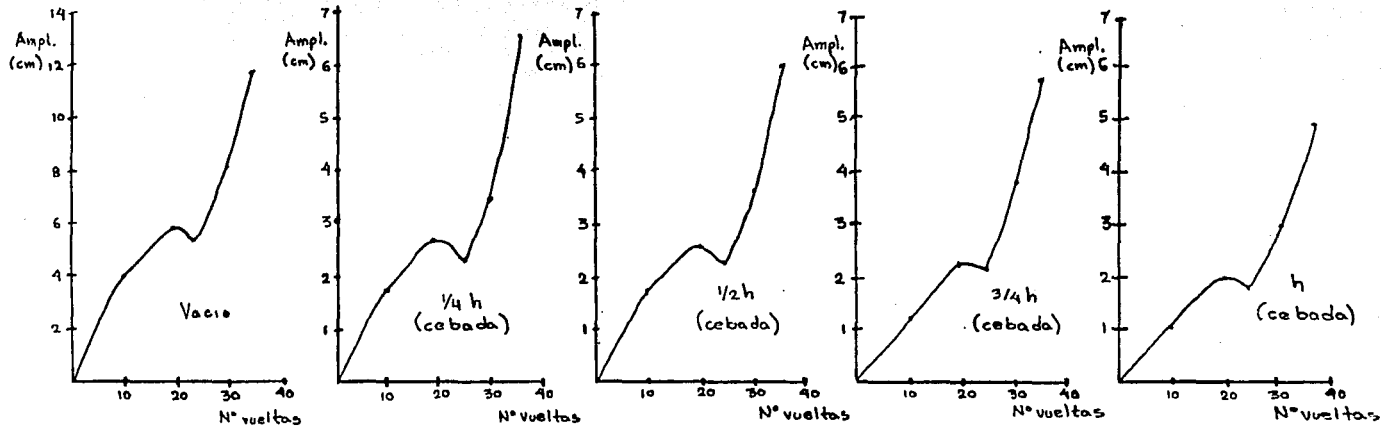
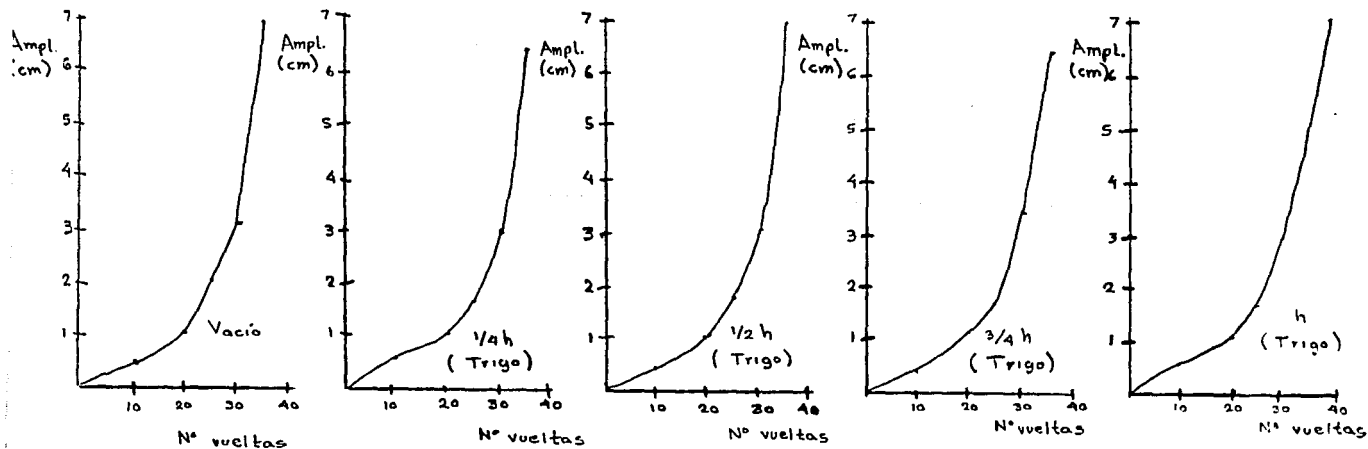
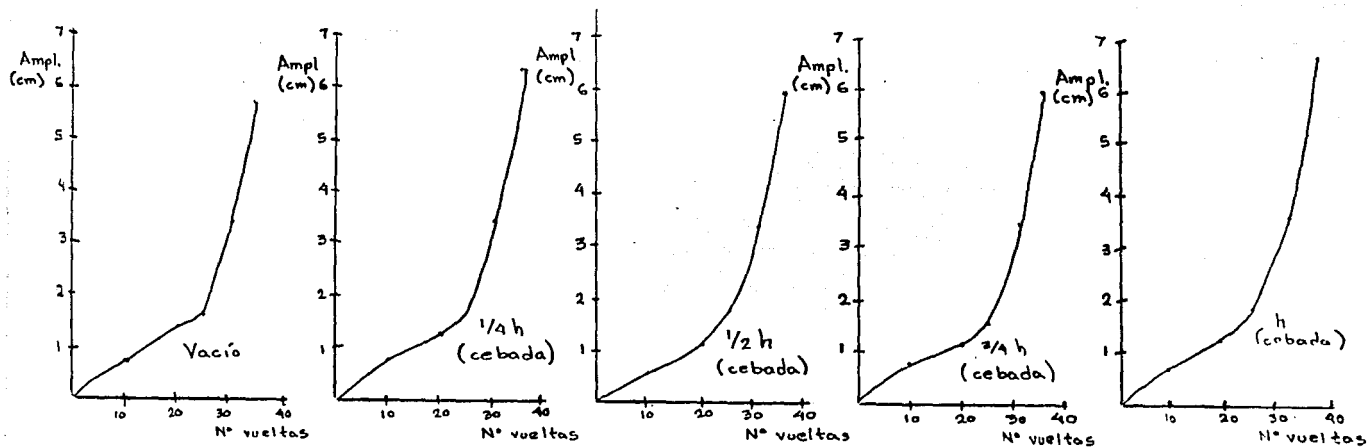


FIG. 72 TUBO DE ASBESTO - CEMENTO



En las tablas 7-I y 7-II se pueden observar diferencias en los registros obtenidos de algunas de las pruebas, en las cuales, al hacer el correspondiente promedio de las tres lecturas, se loora en una forma soméra ajustar estos valores.

La diferencia existente en dichos valores se pueden justificar con algunas de las observaciones hechas durante el trascurso de las pruebas y que a continuación se mencionan :

- Las lecturas hechas en el osciloscópio correspondientes a la respuesta de aceleración del tubo, las que son registradas como amplitud máxima de la señal en el osciloscópio, fueron leídas por una sola persona, por lo que el criterio de apreciación de cual fué la máxima amplitud (debido al constante movimiento de vibración de la señal) fué el mismo en todos los casos

- Un fenómeno importante observado en las lecturas, es el correspondiente a una amplitud mucho más grande que la registrada, y que se presentó en cada una de las pruebas en forma periódica. Lo anterior se ejemplifica con la fig. 7.3 y nos puede llevar a confirmar que en una misma lectura se observarán dos valores de la frecuencia de la estructura correspondientes a dos diferentes modos de vibrar.

- Se apreció que la pulsación (o vibración) que se presentó en la señal registrada en el osciloscópio, fué disminuyendo conforme se incremento la altura de llenado del material granular en el tubo, lo que trajo como consecuencia un registro más uniforme y por lo tanto poder hacer una lectura más correcta. Esta uniformidad en la lectura, puede ser debido a que conforme se llenaba más el tubo con grano, existió una mayor fricción entre el grano y grano, así como entre grano y pared del tubo, ocasionando se tuviera mayor forma de liberar energía y en consecuencia tener un mayor amortiguamiento

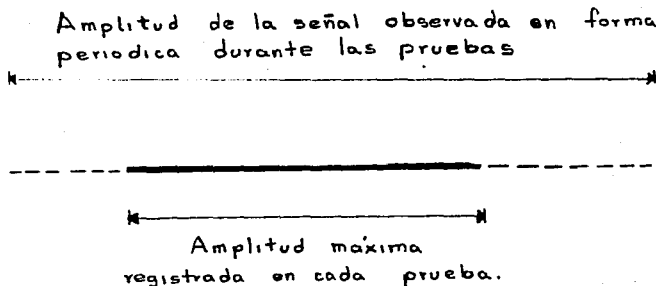


FIG. 7.3

VARIACIÓN DE LA AMPLITUD DE ACCELERACIÓN EN LA SEÑAL DEL OSCILOSCÓPIO

- Los registros obtenidos para cada uno de los dos tubos fueron mucho más claros (con menos pulsaciones) los correspondientes al tubo de lámina de acero. En parte puede ser debido a la gran diferencia de rigidez existente entre los dos tubos, así como a la forma de empotramiento de cada uno de ellos, en donde como ya se menciona en el capítulo anterior, el empotramiento logrado para el tubo de acbesto-cemento es muy deficiente.

- Así como existió uniformidad en la señal del osciloscópio, también se apreció que la amplitud máxima fué disminuyendo conforme se incrementaba la cantidad de grano almacenado en el tubo; esto se puede corroborar con las gráficas ya presentadas, en donde se aprecia que la máxima respuesta del tubo se obtiene para la condición de tubo vacío

- Un aspecto muy importante suscitado durante el trascurso de las pruebas, es el producido por las bandas que unen el sistema de poleas, y que como se menciona en el apéndice, son parte importante del sistema que produce el cambio de frecuencia proporcionada a la mesa vibratoria; consiste en que los días que se realizaron varias pruebas consecutivas, las bandas se calentaron y en consecuencia tendieron a aflojarse, ocasionando que para un mismo valor del número de vueltas del volante de control de la frecuencia en la mesa, se tuviese un valor menor en la respuesta de aceleración de la estructura y que se pudo comprobar al comparar las amplitudes registradas en dos pruebas consecutivas en estas condiciones, teniendo mayor respuesta la primera de éstas pruebas

- Un factor que influyó de manera importante en la lectura de los registros, es el hecho de tener que vaciar el material granular ya introducido en el tubo, teniendo como consecuencia tener que bajar el tubo de la mesa vibratoria para cada una de las pruebas, produciendo se modificara condición de empotramiento conforme aumentaba el número de pruebas. Este hecho produjo un sensible aumento en la amplitud del registro.

Se puede pensar que este aspecto se compensa con el de disminución de la señal, antes mencionado, pero no se puede afirmar que así haya sucedido ya que los dos fenómenos no se presentaron en forma evidente

- No se obtuvieron registros de deformación en el tubo por medio de los micrómetros, debido al problema de mantener a la estructura donde se fijaron estos aparatos, muy rígida para evitar que ésta comience a vibrar y poder obtener así lecturas confiables. Un aspecto importante de mencionar referente a los micrómetros, es que algunas pruebas en que sí se mantuvieron conectados al tubo, las agujas que indican las lecturas en estos, presentaban un gran movimiento que fué prácticamente imposible realizar la lectura.

Una vez mencionados los aspectos más importantes que se presentaron durante las pruebas, en lo que sigue se trata de interpretar los resultados obtenidos de estas pruebas.

Como primer paso para interpretar los resultados obtenidos, se muestran la gráficas de las fig. 7.4, 7.5, 7.6 y 7.7 en donde se presentan las curvas obtenidas de las figuras 7.1 y 7.2, pero en forma tal, que se puede hacer un análisis comparativo de los resultados.

Amplitud  
Registro  
(cm)

— Vacio  
- - - 1/4 h  
- · - 1/2 h  
- · · - 3/4 h  
- o - h

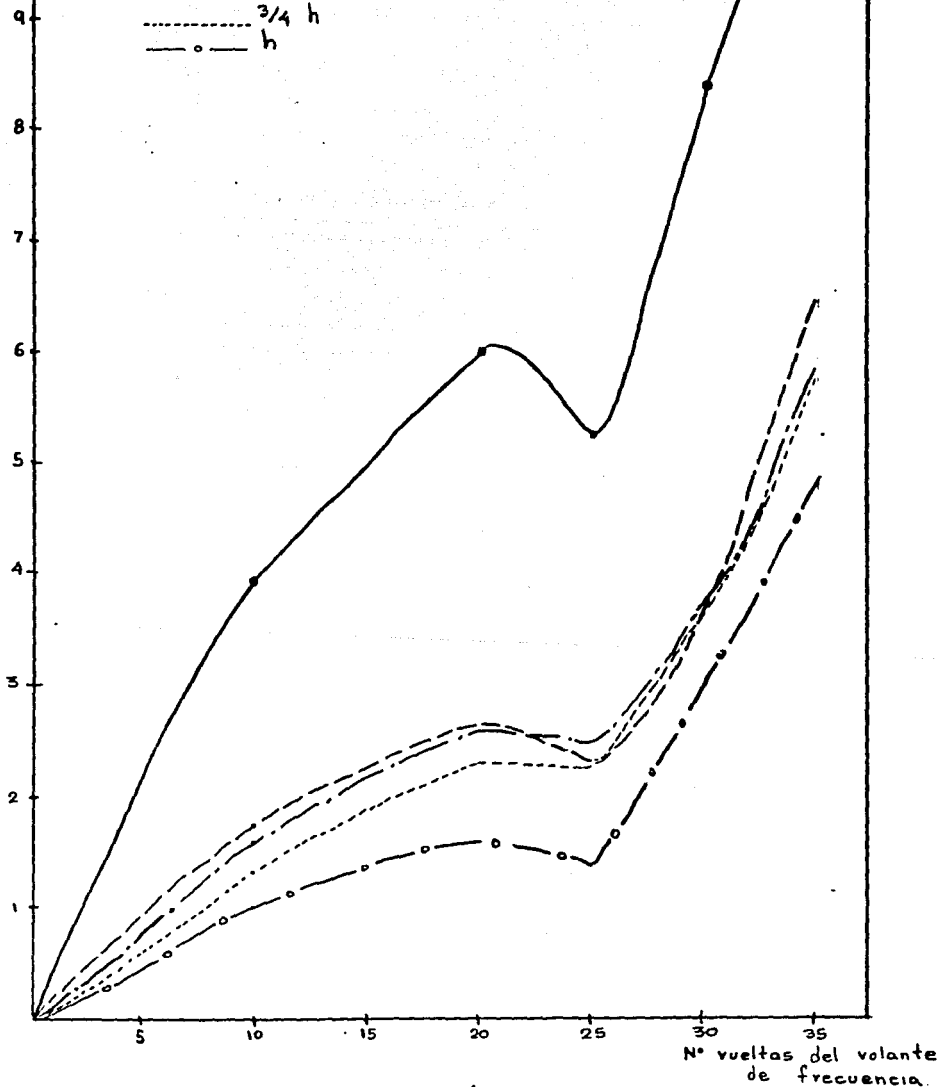
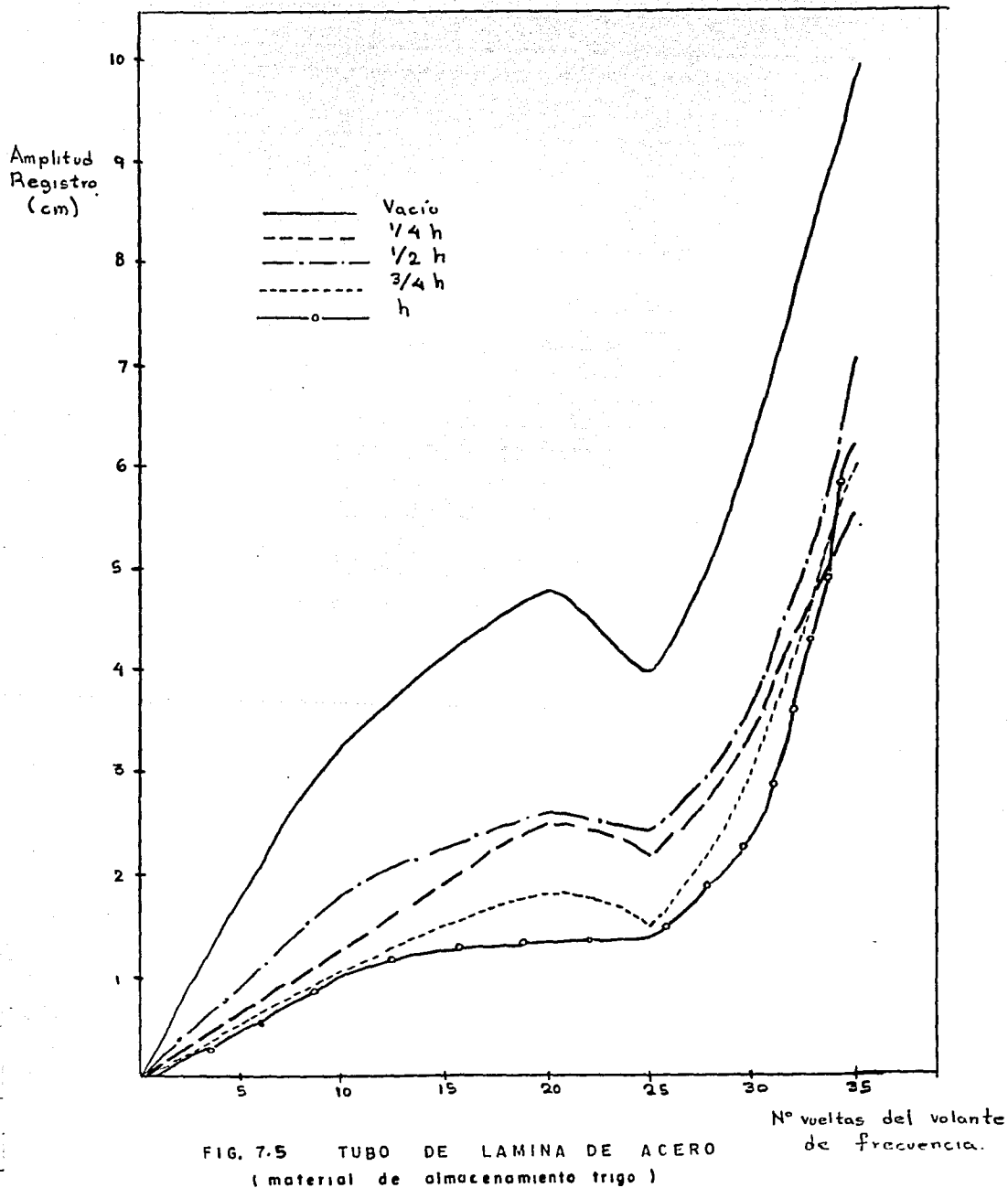
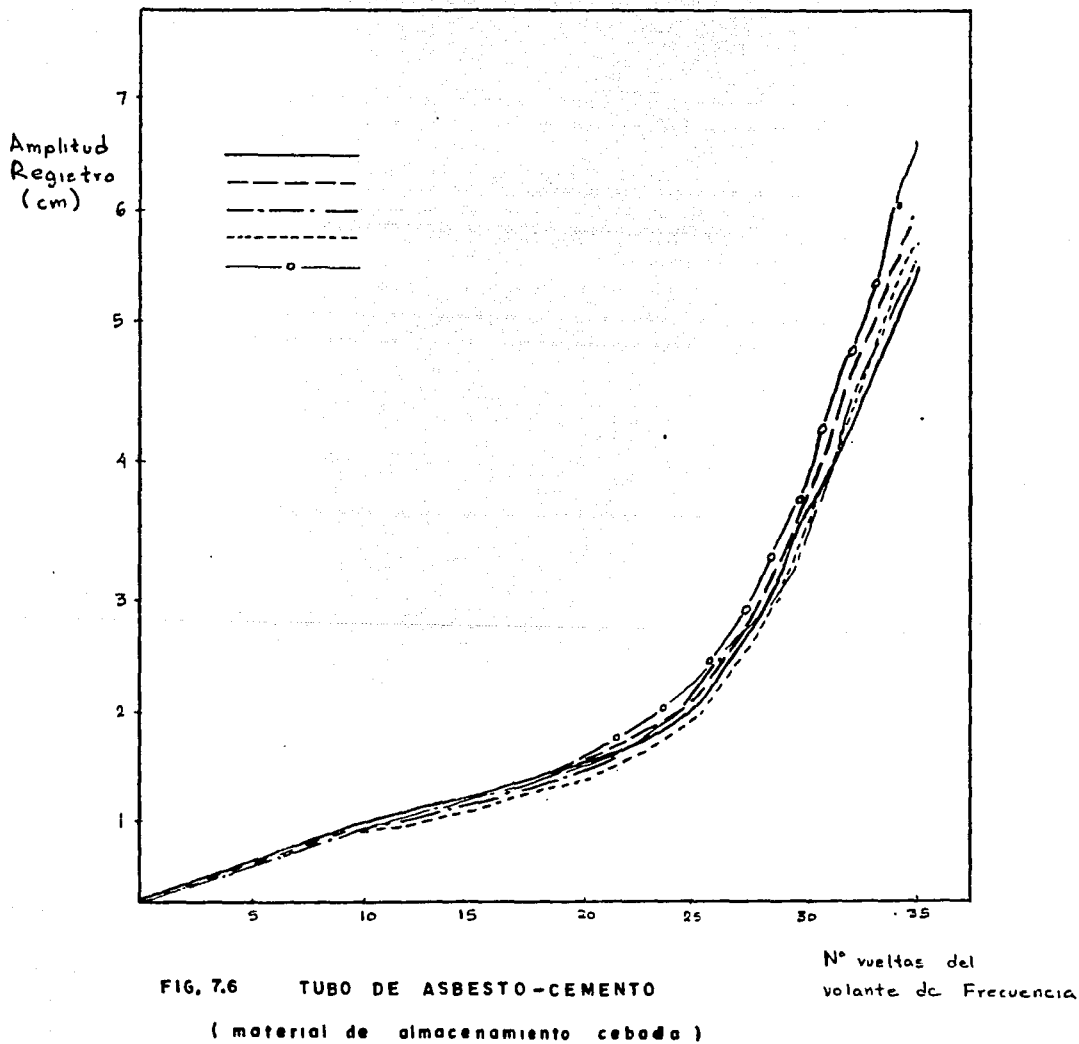


FIG. 7.4 TUBO DE LÁMINA DE ACERO  
( material de almacenamiento cebada )







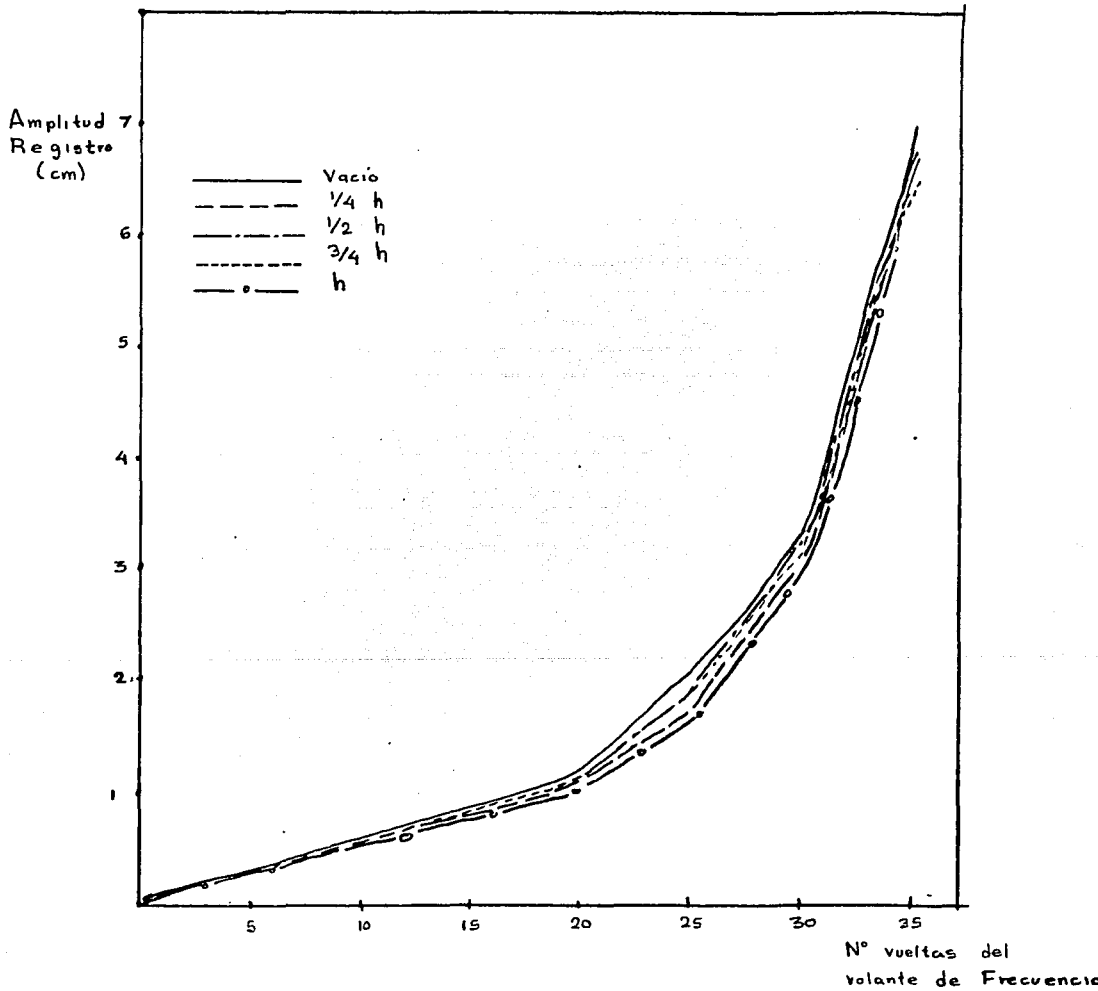


FIG. 7.7 TUBO DE ASBESTO-CEMENTO

( material de almacenamiento trigo )

Las fig. 7.4 y 7.5 corresponden al tubo de lámina de acero, pero con diferente material de almacenamiento. De dichas gráficas se pueden mencionar las siguientes características:

1. Al comparar los valores de amplitud de registro para un mismo número de vueltas del volante de control de frecuencia de la mesa, en cada uno de los dos tipos de grano, se observa gran semejanza en el valor de estas amplitudes.

Lo antes mencionado se debe fundamentalmente a que los valores de pesos volumétricos para cada uno de los dos tipos de grano son muy semejantes; y como el valor de la frecuencia depende en parte del peso, se tiende a obtener respuestas similares. Esta semejanza en la amplitud de la respuesta, nos hace suponer que para este tipo de material, la fricción existente entre grano con grano y grano con pared del tubo, no influyó de manera importante en la respuesta del tubo.

2. De las curvas mostradas en las figuras se puede observar que todas estas tienen un comportamiento similar, consistente en tener un pico de amplitud máxima para un determinado número de vueltas del volante de frecuencia.

3. Comparando las curvas de respuesta para cada tipo de grano, se observa que la curva correspondiente al tubo vacío es la que presenta mayores amplitudes.

4. Según el comportamiento de las curvas de respuesta mencionado en el punto 2, nos indica la posible aparición de resonancia en el tubo (esta se logra cuando la frecuencia de la mesa se iguala con la frecuencia del tubo) en donde con la ayuda de las curvas de calibración de la mesa le corresponde un valor de la frecuencia igual a 1.5 Hz para los dos tipos de grano y que correspondería este valor al de la frecuencia del primer modo de vibrar de la estructura.

5.- El incremento de la amplitud del registro después de haberse presentado el primer pico, nos puede indicar la existencia de otro valor de la frecuencia máxima que correspondería a un segundo modo de vibración (se puede decir que es el observado en el registro de la señal cuando se amplifica de manera importante).

6. Se puede observar que la respuesta de la estructura disminuye de manera importante conforme se aumento la cantidad de material almacenado en el tubo.

Lo anterior se confirma al utilizar la siguiente relación para obtener el valor de la frecuencia de resonancia:

$$W = \sqrt{k / m}$$

donde W representa el valor de la frecuencia, k la rigidez del sistema y m la masa de éste.

Con esta relación se puede observar que al aumentar el valor de la masa, el correspondiente a la frecuencia disminuye. Lo cual se comprobó en las pruebas.

En lo referente al tubo de asbesto-cemento, debido a la gran masa de éste, no presenta variación notable en la respuesta del tubo, cuando se tiene vacío o cuando se llena con grano a diferentes alturas.

Por lo tanto las curvas mostradas tienen un comportamiento muy similar y con valores de amplitud en todos los casos casi iguales. Si volvemos a utilizar la expresión para calcular frecuencia, nuevamente volvemos a comprobar su validez, ya que el tubo de asbesto-cemento al ser muy rígido ocasiona se tenga un valor de frecuencia alto, y en consecuencia durante las pruebas no poder hacerlo entrar en resonancia, lo que se comprueba con el comportamiento de las curvas que siempre tiende a un valor más grande de la frecuencia al aumentar el número de vueltas del volante de frecuencia de la mesa.

Finalmente se muestra en la tabla 7-III un resumen de los resultados obtenidos tanto del análisis teórico como del experimental para cada uno de los dos tubos.

De la tabla mostrada se tienen las siguientes observaciones :

- En lo referente al análisis teórico, se observa un cambio importante del valor de la frecuencia según el tipo de análisis empleado, correspondiendo frecuencias más altas cuando se emplea el análisis que considera el efecto de vibración extensional; esto se apreció en el tubo de lámina de acero, mientras que para el tubo de asbesto-cemento, se ve una gran semejanza en los valores de la frecuencia para cuando se considera el efecto de flexión y el de vibración extensional

- Los valores anotados en la tabla correspondientes a los resultados experimentales, los de la primera columna para cada tipo de material, indican el valor de la frecuencia, en donde para el caso del tubo de lámina es igual en todos los casos, esto se debe a la poca flexibilidad que se tenía para poder hacer las lecturas para diferente número de vueltas del volante de frecuencia el cual fué aumentando para valores de 10, 20, 25, 30 y 35 vueltas, apreciándose el pico de máxima amplitud, para un valor de 20 vueltas y que no se podía determinar si en verdad correspondía a este valor y no a un número más bajo o alto que 20 vueltas.

Para poder tener una idea, de cual es la prueba que presentaba mayor respuesta, se anotan en la segunda columna correspondiente al tipo de material, el valor de la amplitud de la señal en cada caso, notándose el decremento de este valor conforme aumento la cantidad de grano almacenado en el tubo.

- Un aspecto importante que se tiene en la tabla, es que no se anotaron valores de la frecuencia en los resultados experimentales para el tubo de asbesto-cemento, debido a que como ya se explico anteriormente, no se pudo hacer entrar en resonancia al tubo de asbesto-cemento.

- Al comparar los valores de frecuencias obtenidos para el análisis teórico y el experimental, se aprecia que son totalmente diferentes.

Tabla 7-III Resumen de resultados

## Tubo de Lámina de Acero

Resultados Analíticos				Resultados Experimentales						
tubo		lleno	lleno	vacio	Grano	Cebada		Trigo		
Análisis		Cebada	Trigo		Tubo	Frecuencia	Amplitud	Frecuencia	Amplitud	
Flexión		32.07	28.699	377.87	vacio	1.5	6	1.5	4.75	
Vibración Extensional (esf. membrana)	Onda longitudinal = H	229	205.69	747.94	1/4 h	1.5	2.67	1.5	2.50	
	Onda longitudinal = 2H	110.22	98.60	358.60	1/2 h	1.5	2.58	1.5	2.58	
Vibración	Deformación en 2 direcciones	.4855	.4827	1.5796	3/4 h	1.5	2.33	1.5	1.83	
Inextensional	Def. en 3 direcciones	con L = H	.4861	.4369	1.5933	lleno	1.5	2.08	1.5	1.03
		con L = 2H	.4866	.43369	1.5830					

## Tubo de Asbesto-Cemento

Resultados Analíticos				Resultados Experimentales						
tubo		lleno	lleno	vacio	Grano	Cebada		Trigo		
Análisis		Cebada	Trigo		Tubo	Frecuencia	Amplitud	Frecuencia	Amplitud	
Flexión		112.78	105.59	161.54	vacio	—	—	—	—	
Vibración Extensional (esf. membrana)	Onda longitudinal = H	114.80	107.47	154.43	1/4 h	—	—	—	—	
	Onda longitudinal = 2H	47.61	44.577	65.201	1/2 h	—	—	—	—	
Vibración	Deformación en 2 direcciones	34.39	32.199	49.263	3/4 h	—	—	—	—	
Inextensional	Def. en 3 direcciones	con L = H	34.52	32.318	49.445	lleno	—	—	—	—
		con L = 2H	34.426	32.230	49.3104					

## VIII .- C O M E N T A R I O S   F I N A L E S

Se presentan en este capítulo como una serie de comentarios finales los estudios a los que ha llegado el profesor Koichi Shibata y en los cuales cubre en gran parte los estudios de modelos y silos reales (ref. 25).

En el estudio realizado se discuten los siguientes problemas para determinar cuantitativamente la masa efectiva de grano y polvo en un silo de acero:

- Método para determinar la masa efectiva
- Diferencias entre la masa efectiva para varios tipos de material almacenado
- Diferencias entre las características de vibrar del modelo del silo a escala real
- Influencia de la cantidad de material almacenado y características de vibración del silo
- Método de análisis que explique la vibración experimental

Para obtener lo anterior se plantea un método que determina la masa efectiva donde emplea el valor de la frecuencia natural del sistema.

La relación entre la masa efectiva y la frecuencia natural ( ) se puede obtener al resolver la ecuación de movimiento para el silo fig. 8.1 y por lo tanto la relación de masa efectiva en el silo se determina al obtener el valor de la frecuencia natural del silo en forma experimental y utilizando la figura 8.1 se obtiene .

Por otra parte, el autor examina 3 métodos de análisis para determinar cual es el más adecuado:

- Método de Rayleigh, en el cual la función de deflexión es supuesta como la curva de flexión de una viga
- Método de Lagrange donde considera la curva de desplazamiento de resonancia
- Método de la matriz de transferencia.

a) Método 1. La masa del silo y del material almacenado es considerado como masas concentradas, ver fig. 8.2

b) Método 2. La masa del silo y del material contenido es tratado como masas consistentes y se utiliza la siguiente ecuación, como se describió previamente en el capítulo V :

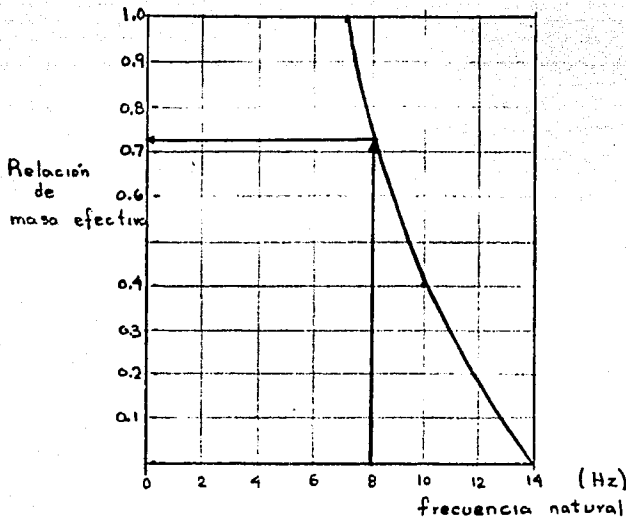


FIG. 8.1 VALORES EXPERIMENTALES DEL SILLO CON GRANO

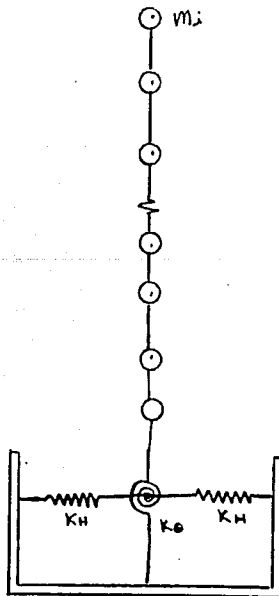


FIG. 8.2 MODELO I

Las dimensiones del modelo en estas pruebas se presentan en la tabla B-I y las propiedades del material utilizado se muestran en la tabla B-II.

Tabla B-I Modelo para el Análisis

Modelo	Longitud (cm)	Radio (cm)	Espesor del cilindro (mm)	Espesor de la placa (mm)
No. 1	135	25	1	4
No. 2	135	25	4.5	4.5

Tabla B-II Propiedades de los Materiales

Material contenido	Material granular			Polvos	
	Sorgo	Retabel	Cereal	Ceniza	Harina
Fase específica	.72	.91	.89	.65	.37
Compresibilidad (%)	73	101	119	565	538
Angulo de reposo	36.40	33.90	38.1	44.2	34.8

Se realizaron 3 tipos de pruebas diferentes:

- Pruebas de vibración forzada utilizando mesa vibratoria
- Pruebas de vibración libre
- Pruebas de carga estática por fuerza lateral

El contenido de material en los modelos varió de 1/8 a 8/8 en intervalos de 1/8.

En lo referente a las pruebas en silos reales en la fig. 8.3 se muestra un detalle del silo y en tabla 8-III las características del material de almacenamiento empleado. Se tuvieron 4 tipos de pruebas :

- Pruebas de vibración forzada usando un generador
- Pruebas de vibración libre
- Pruebas de vibración simulando un temblor
- pruebas de carga estática por fuerza lateral

La cantidad de material almacenado en cada prueba se varió en 2/8, 3/8, 4/8 y 8/8.

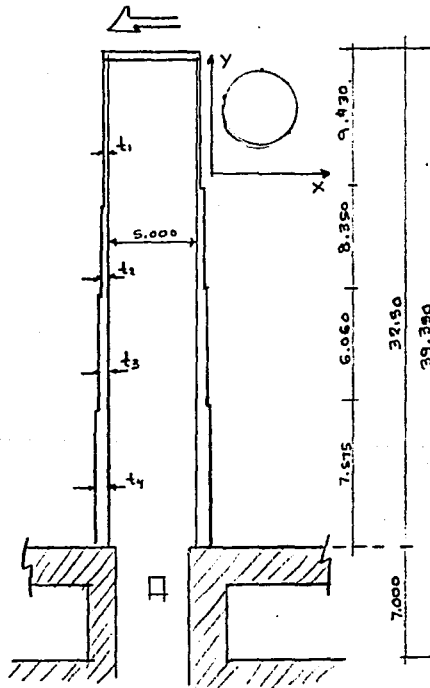


FIG. 8.3

SILO A ESCALA REAL



Para el caso de la matriz de transferencia para determinar los coeficientes dinámicos del tipo se comparó en la tabla E-IV los resultados de diferentes métodos en donde se observa que los resultados de la matriz de transferencia son los más bajos. Al mismo, en la tabla E-V se comparan los valores experimentales y analíticos del modelo del tipo observándose gran semejanza de los valores experimentales con los valores obtenidos con el método de la matriz de transferencia.

Tabla E-III Propiedades de Granos

	Cebada	Sorgo
Peso específico	.70	.76
Comprimibilidad	11% %	7% %
Ángulo de reposo	19.0°	34.4°

Tabla E-IV Comparación de la frecuencia natural determinada de análisis

N o d e l o	En otros artículos			En este artículo			
	Referencia 2†	3*	Referen- cia 4†	Rayleigh		Ecuación de Lagrange	Matriz de transfe- rencia (2)
	matriz de transferen- cia en el elemento en cascaron	Rayleigh Ritz	Rayleigh	Función de defle- xión 1	Función de defle- xión 2		
No. 1	151.20	157.01	202.4	147.2	157.7	141.7	151.4
No. 2	201.20	207.49	202.4	191.4	217.2	215.2	199.7

† Referenciados en la referencia 25

El resultado del  $\frac{W_1}{W_2}$  es  $\frac{15419}{15298} = 1.008$ , que difiere de la unidad en 0.8%.

La relación entre frecuencia natural y la cantidad de grano almacenado se presenta gráficamente en las figuras E.4 y E.5 para el silo a escala real correspondientes al 1<sup>o</sup> y 2<sup>o</sup> modo de vibración, respectivamente.

Tabla E-V. Comparación entre valores analíticos y experimentales

Dinámica del modelo de silo	Experimental	Rayleigh	Matriz (1)	Matriz (2)
R= 250 cm	1488	15419	15298	15298
R= 400 cm		(1091)	(1091)	(1071)
L= 0.1				(HL)

1 Relación entre el valor analítico y el valor experimental

Tabla E-VI Frecuencia natural obtenida del experimento

Material	Modelo de silo					
	Vacío	Sorgo	Letado	Leña	Harina	Carbón
Pruebas de vibración libre	1488	-	771	-	315	715
Pruebas de vibración forzada	1304	616	543	591	245	517

(Hz)

Tabla E-VII Frecuencia natural obtenida del experimento

Material	Silo a Escala Real					
	Vacío		Sorgo		Leña	
	10	20	10	20	10	20
Pruebas de vibración libre	1.21	-	1.35	-	-	-
Pruebas de vibración forzada	1.17	-	-	-	1.1	1.1
Pruebas de aceleración	1.41	11.10	1.47	11.71	-	-

(Hz)

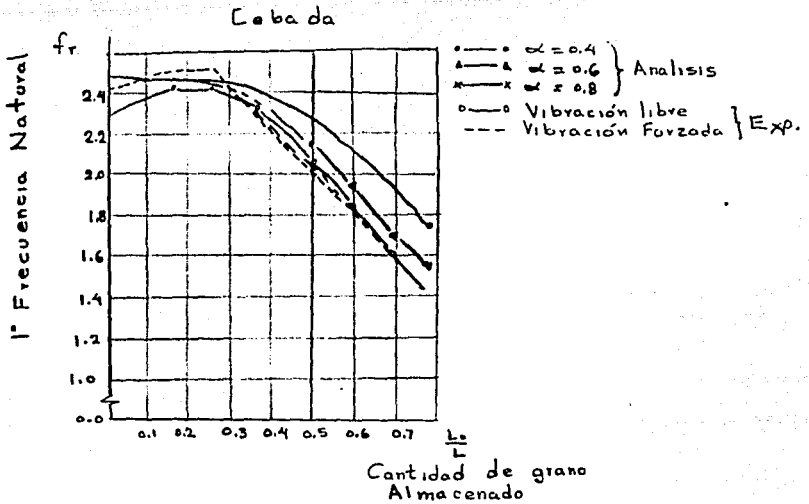


FIG. 8.4 RELACIÓN ENTRE FRECUENCIA NATURAL Y CANTIDAD DE GRANO ALMACENADO

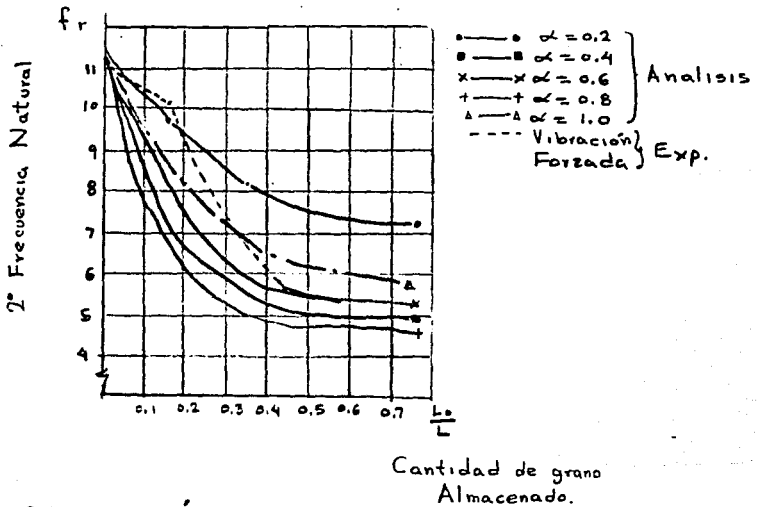


FIG. 8.4 RELACIÓN ENTRE FRECUENCIA NATURAL Y CANTIDAD DE GRANO ALMACENADO

Al examinar estas figuras, se observa que la 1ª frecuencia natural no es afectada sustancialmente por la cantidad de grano almacenado hasta  $1/4-1/3$  de su capacidad; por otro lado, la 2ª frecuencia es afectada significativamente en este intervalo y no es afectada a partir de  $1/2$  de la capacidad de llenado.

La relación de masa efectiva determinada se presenta en la tabla I-7, en donde se observa que los resultados de la relación de masa efectiva es de  $0.7-0.8$  independientemente del tipo de material almacenado y del tamaño del espécimen.

Finalmente se presentan las conclusiones principales del estudio anterior:

1) La proporción de masa efectiva del material granular en el 1º modo de vibrar es de  $0.7-0.8$ , el cual es independiente de las propiedades del material y de la escala del silo

2) La proporción de masa efectiva en el 2º modo de vibrar es menor en el 1º modo de vibrar

3) La influencia de la cantidad de material almacenado en las características de vibración:

- Para  $0-1/3$  de la capacidad del silo; poca influencia en el 1º modo de vibrar e influencia significativa en el 2º modo de vibrar

- Intervalo de  $1/2-1/1$  de la capacidad del silo; gran influencia en el 1º modo de vibrar y poca influencia en el 2º modo de vibrar

4) Efecto del material de almacenamiento en el amortiguamiento:

- En el modelo del silo no se observa

- En el silo a escala real se observa que depende fundamentalmente de la interacción entre el silo y el suelo

5) El análisis dinámico usando el método de la matriz de transferencia, proporciona gran aproximación para predecir las características de vibración del silo.

## X . - R E F E R E N C I A S

- 1.- Reimbert, M. A. "Silos Teoría y Práctica". American Lac
- 2.- Ravonel, J. "Silos", Tomos I, II y III Editores Técnicos Asociados
- 3.- Theimer, O. F., "Failures of Reinforced Concrete Grain Silos". Journal of Engineering for Industry, Trans. ASME, Vol 91, Serie B, Nº 2, mayo 1969, pp 460-476.
- 4.- Flores, R. "Engineering Aspects of the Earthquake in the Maipo Valley", Proc. World Conf. Earthquake Engineering. Tokio. 1960, p 416.
- 5.- Favol C., Agent R. y Pusca A. "Aseismic Design of Cereal Silos in Romania". Proc. VIII World Conf. Earthquake Engineering. San Francisco. 1984.
- 6.- ACI Committee 313. "Recommended Practice for Design and Construction of Concrete Bins, Silos, and Bunkers for Storing Granular Materials (ACI- 313-77)". American Concrete Institute. Detroit, 1977.
- 7.- Hauron, M. y Tayel M., "Response of Tanks to Vertical Seismic Excitations", Earthquake Engineering and Structural Dynamics, Vol 13, 1985, pp 583-595.
- 8.- De la Colina Martínez, J. "Acción Sísmica en Baterías de Silos", Tesis profesional para grado de Maestría, F. Ingeniería, U.N.A.M.
- 9.- Hauron, M. A., "Vibration Studies and Test of Liquid Storage Tanks", Earthquake Engineering and Structural Dynamics Vol 11, 1983, pp 179-206.
- 10.- Sasaki, Y. y Yoshimura, J., "Dynamic Behavior of Concrete Stave Silos", Proc. VIII World Conf. Earthquake Engineering, San Francisco. 1984, pp 937-944.
- 11.- Shimamoto, A., Kodama, M. y Yamamura, M., "Vibration Test for Scale Models of Cylindrical Coal Storage Silo". Proc. VIII World Conf. Earthquake Engineering. San Francisco, 1984.
- 12.- Del Valle, C.E., "Aplicación del método de Stodola-Vianello-Nowmark para estructuras a flexión". VIII Curso Internacional de Ingeniería Sísmica. División de Educación Continua. Facultad de Ingeniería UNAM. México, 1982.
- 13.- H. R. Mahori and R.T. Severn "Hydrodynamics Effects in Steel Liquid Storage Tanks" Department of Civil Engineering, University of Bristol, Bristol BS8 1TR. VC pp 483-508
- 14.- Flugge, "Handbook of Engineering Mechanics"
- 15.- A. Ghali, "Circular Storage Tank and Silos"
- 16.- Koichi Shibata "Observaciones Experimentales y Estudio Teórico de las Vibraciones de Silos Llenos de Grano y Polvo". Transaction of the Architecture Institute of Japan.
- 17.- Chandrasekaran, A.R. y Jain P.C. "Effective Live Load of Storage Material under Dynamic Condition". Indian Concrete Journal Vol. 42 No9, Sept. 1968, pp 364-365
- 18.- Rodríguez Cuevas N., "Torres y Chimeneas". XI Curso Internacional de Ingeniería Sísmica. División de Educación Continua. Facultad de Ingeniería UNAM. México, 1985.

19.- Shimamoto, A., Sato, T., Uedama, H., Yamamura, "Dynamics Analysis of Cylindrical Coal Silos", Abstracts of Special Meeting of the IIR, Sept. 1981, pp 500-504

20.- A.G. McLean, F.C. Arnold, "Simplified Mass-Flow Bin Wall Load Predictions". Journal of Bulk Solids Handling, vol 3, No 4, November 1982, pp 787-793

21.- G.V. Jenike, J.R. Johanson, "Bin Load Part-3; Mass Flow Bins". Journal of the Engineering for Industry, Serie B, vol 93 No 1, 1973, pp 6-12

22.- A.W Jenike, J.R. Johanson, "Bin Load Part-4; Funnel-Flow Bins", Journal of Engineering for Industry, Trans. ASME. Serie B vol 97, No 3, 1974, pp 13-16

23.- Koichi Shibata "Studies of the Vibration Characteristics of the Silo". Transactions of the Architectural Institute of the Japan, No 293, July 1986, pp 57-67

24.- Eduars C. Pestel and Frederick A. Lechic "Matrix Methods in Elastomechanics", McGraw Hill 1963

25.- Koichi Shibata, "Studies on Earthquake-Proof Design of Steel Silos", Proceedings, World Conf. on Desing of Silos for Strength and Flow, Londres 1983

A P E N D I C E  
CALIBRACION DE LA MESA  
VIBRATORIA DE LA  
E. N. E. P. ARAGON

La mesa vibratoria que se tiene en los laboratorios de la E.N.E.P. Aragón, es una máquina construida en el año de 1985 por el ingeniero Luis Hernaldo de la Garza, en la empresa "Maquinaria de alta calidad".

La función de la mesa vibratoria es simular en forma aproximada los efectos que produce un movimiento senoidal, y poder así, desarrollar diversas investigaciones encaminadas a estudiar las propiedades dinámicas de diferentes estructuras, mediante la elaboración de modelos a escala reducida de los prototipos reales.

Para el buen funcionamiento de la mesa vibratoria, fué necesario cimentarla en una losa de concreto reforzado con un espesor de aproximadamente 40 cm. Las dimensiones y un esquema general de la mesa vibratoria se muestra en las figuras A-1 y A-2.

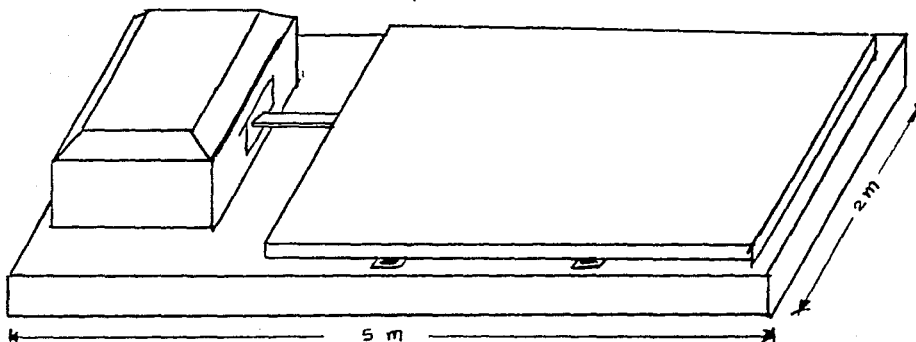


FIG. A-1 ISOMÉTRICO

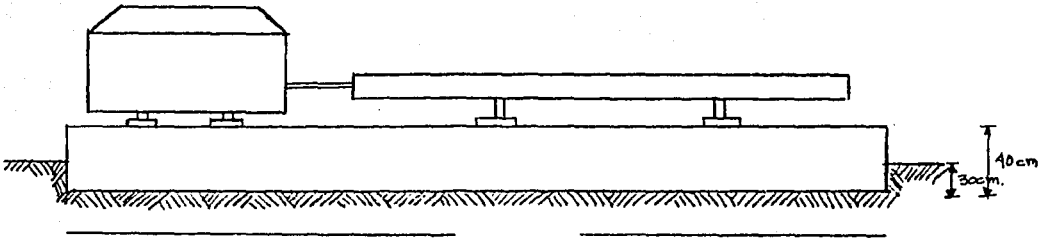


FIG. A-2      P E R F I L

La mesa vibratoria está compuesta de 6 partes principales :

1. Motor eléctrico
2. Sistema de poleas
3. Eje excéntrico
4. Volante de control de frecuencia
5. Volante de control de desplazamiento
6. Placa de acero o mesa vibratoria propiamente dicho

En las figuras A-3 y A-4 se ilustra en forma general lo que en conjunto es el sistema de movimiento de la mesa vibratoria, señalando en dichas figuras cada una de las 6 partes que la forman, las que se mencionaron anteriormente. A continuación se describen con más detalle cada una de estas partes.



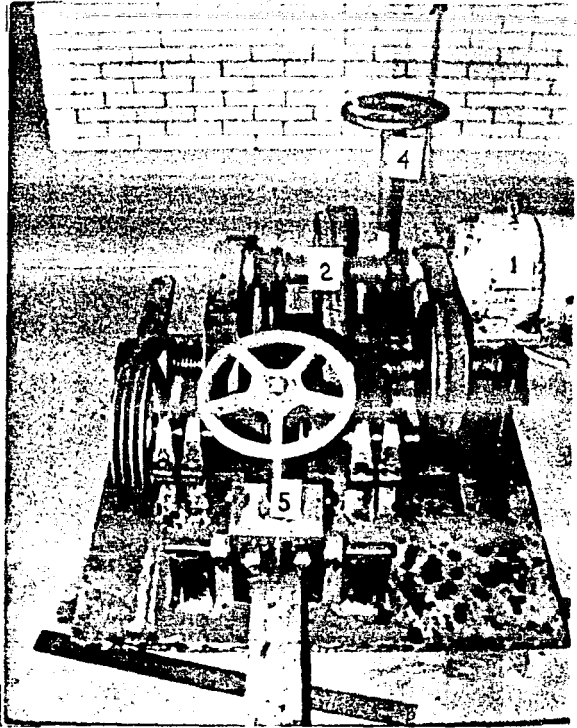


FIG. A-3 COMPONENTES DE LA MESA VIBRATORIA

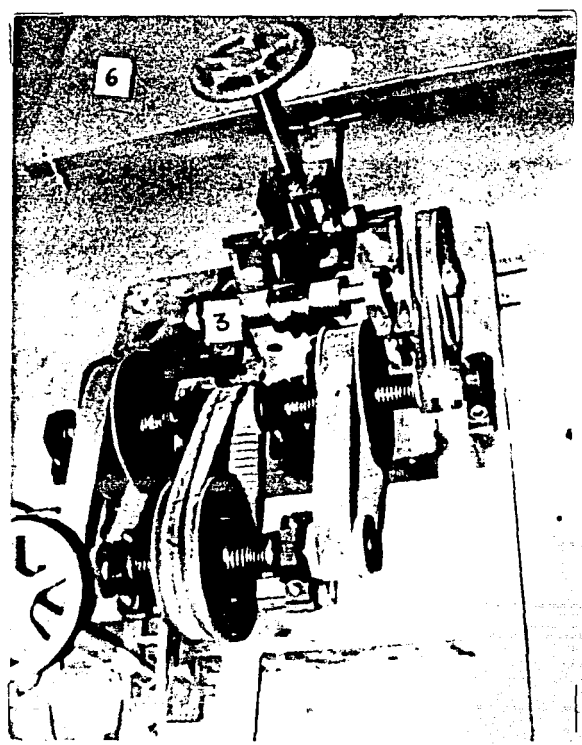


FIG. A-4 COMPONENTES DE LA MESA VIBRADORA

### 1. Motor eléctrico.

El motor eléctrico es la parte principal del sistema, ya que le produce el movimiento a la mesa vibratoria. En las figuras A-3 y A-4 se observa la posición del motor eléctrico, pero para una mejor localización de éste, se presenta la fig. A-5. En esta figura se observa la forma en que se encuentra unido al motor eléctrico el sistema de poleas, dicha unión se realiza por medio de una banda de hule.

Las principales características del motor eléctrico son :

- Marca : General Electric
- Modelo : 21 KT 7546A
- Diseño B
- Temperatura máxima total 155°C
- Voltaje 220/440
- Número de revoluciones por minuto (rpm) : 1725

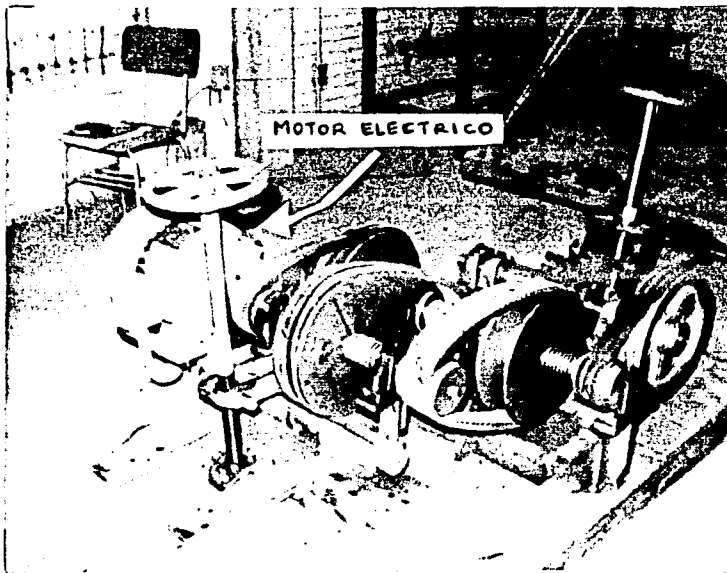


FIG. A-5 LOCALIZACIÓN DEL MOTOR ELÉCTRICO

## 2. Sistema de poleas.

Las poleas son contruidas de acero y tienen la función de reducir el número de revoluciones por minuto (RPM) que proporciona el motor eléctrico y transmitir dicho movimiento al eje excéntrico.

La reducción en el número de RPM se realiza mediante 3 poleas conectadas entre sí por bandas de hule de aproximadamente 10 cm de ancho. La forma en que se encuentran colocadas dichas poleas se muestra en la figura A-6.

En esta figura se observa que la polea colocada en la parte derecha de la misma, es la polea que recibe el movimiento directo del motor eléctrico y en donde se realiza la primera reducción en el número de RPM.

Conectada a esta primer polea se coloca una segunda polea intermedia en donde se produce la segunda reducción en el número de RPM; una tercer polea es conectada a la polea intermedia realizando la última reducción del número de RPM y en la que por medio de ésta última se transmite el movimiento al eje excéntrico.

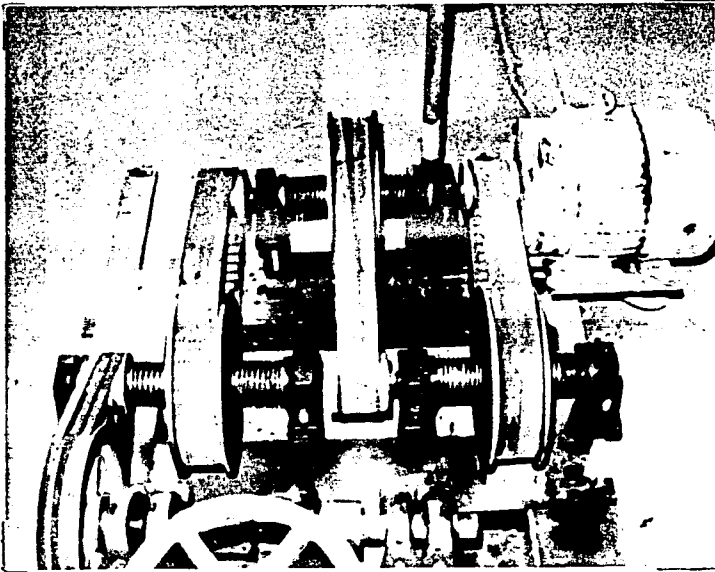


FIG. A-6 SISTEMA DE POLEAS

### 3. Eje excéntrico.

Es la parte del sistema mecánico en donde se transforma el movimiento que proviene del sistema de poleas, en un movimiento de tipo senoidal y el cual lo trasmite a la placa de acero por medio de una biela.

La biela se encuentra conectada al volante que controla el desplazamiento que se le proporciona a la placa de acero, ver fig. A-7. En la misma figura se observa la forma en que se apoya el eje excéntrico, el cual es por medio de 4 chumaceras móviles, colocadas dos a cada lado de la biela; asimismo se muestra la conexión entre el sistema de poleas y el eje excéntrico que se realiza mediante 3 bandas de hule de aproximadamente 2 cm de ancho.

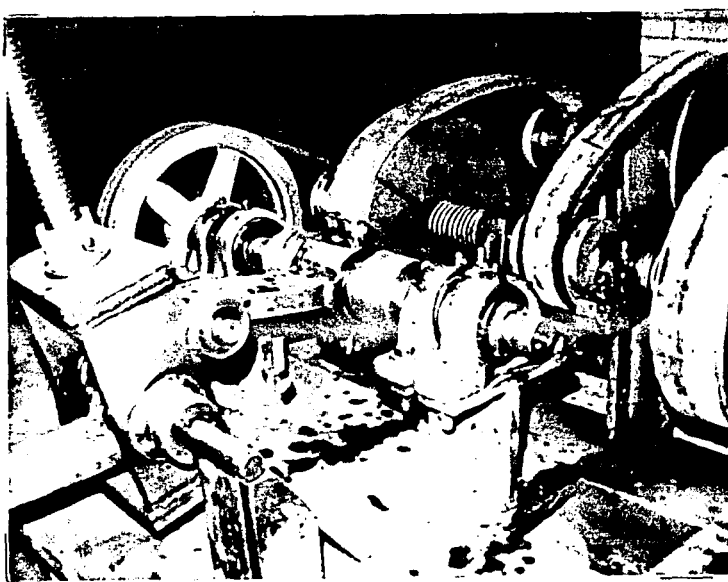


FIG. A-7 EJE EXCENTRICO

#### 4. Volante de control de la frecuencia.

En la figura A-8 se pueden observar dos volantes, de los cuales el colocado en la parte izquierda, es el que corresponde al control de la frecuencia que se proporciona a la mesa vibratoria.

En la misma figura se muestra la colocación del motor eléctrico y de las poleas intermedias, las cuales se encuentran en un mismo eje (le llamaremos eje 1, ver fig. A-8) así también se observa la colocación de las dos poleas extremas en un segundo eje (eje número 2). El eje 1 es móvil, mientras que el eje dos es fijo.

El volante al que nos referimos, controla la frecuencia de la mesa vibradora al poder controlar las distancias que se tiene entre el eje 1 y el eje 2.

Dicho volante al hacerlo girar en sentido antihorario produce un desplazamiento del eje 1, ocasionando se separa el eje 1 del eje 2. Si el volante se gira en sentido horario se obtiene un acercamiento entre los dos ejes. Lo anterior se muestra esquemáticamente en la fig. A-9.

El alejamiento que se tiene entre los ejes al girar el volante en sentido antihorario, hacen que las bandas que unen al motor y el sistema de poleas se tensen de tal forma que se produce un aumento en el número de RPM que se trasmite al eje excéntrico, en consecuencia aumentar el valor de la frecuencia que se proporciona a la mesa vibratoria, dicho aumento es gradualmente mayor según se aumenten el número de vueltas que se le da al volante hasta llegar a una valor máximo.

Caso contrario sucede al hacer girar el volante en sentido horario y acercarse a los dos ejes, provocando se aflojen las bandas de unión y en consecuencia disminuir el número de RPM que se le proporciona al eje excéntrico y en esta forma disminuir el valor de la frecuencia de la mesa.

#### 5. Volante de control de desplazamiento.

De la misma fig. A-8, el volante colocado en la parte derecha, corresponde al del control del desplazamiento que se le puede inducir a la mesa vibratoria.

Dicho volante es la parte que conecta a la biela que sobresale del eje excéntrico con la placa de acero. Un detalle de esta conexión se presenta en la fig. A-10.

En la misma figura se señala con una flecha un eje transversal, el cual es el punto de referencia para aumentar o disminuir el desplazamiento proporcionado a la mesa. También se muestra un brazo que une al volante con la placa de acero.

El desplazamiento de la placa de acero se controla, al girar en cualquier sentido el volante mencionado, ocasionando que suba o baje la posición del brazo que une a la placa de acero. De lo anterior, se tendrá un desplazamiento nulo (aunque se tenga un valor de la frecuencia) cuando se haga coincidir el brazo de la placa metálica con el eje transversal antes mencionado, o se tendrá un máximo desplazamiento cuando se tenga en una posición más baja o más alta del eje transversal al brazo de la placa de acero.

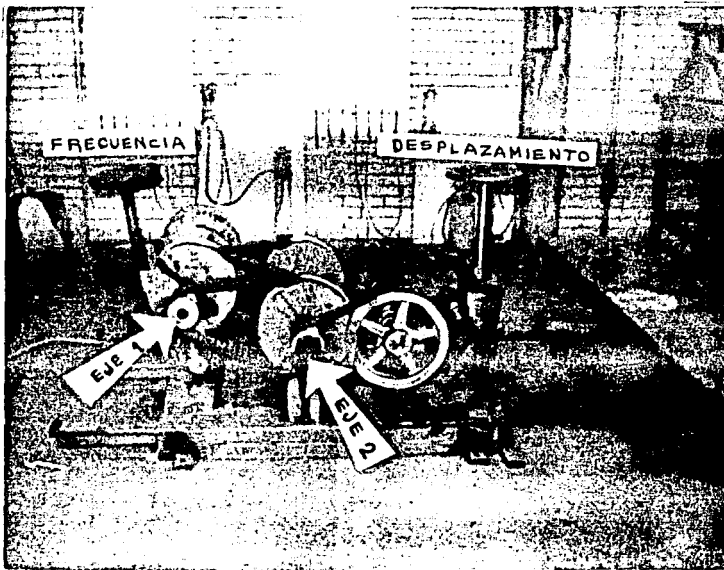
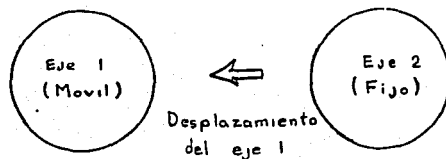
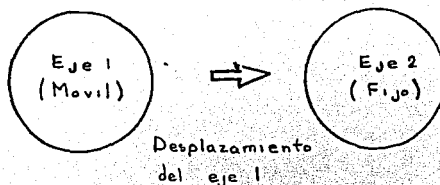


FIG. A-8 VOLANTE DE CONTROL DE LA FRECUENCIA  
Y DESPLAZAMIENTO



a) Giro del volante de control de frecuencia en sentido antihorario



b) Giro del volante de control de frecuencia en sentido horario

FIG. A-9 FORMA DE CONTROLAR LA FRECUENCIA EN  
LA MESA VIBRATORIA

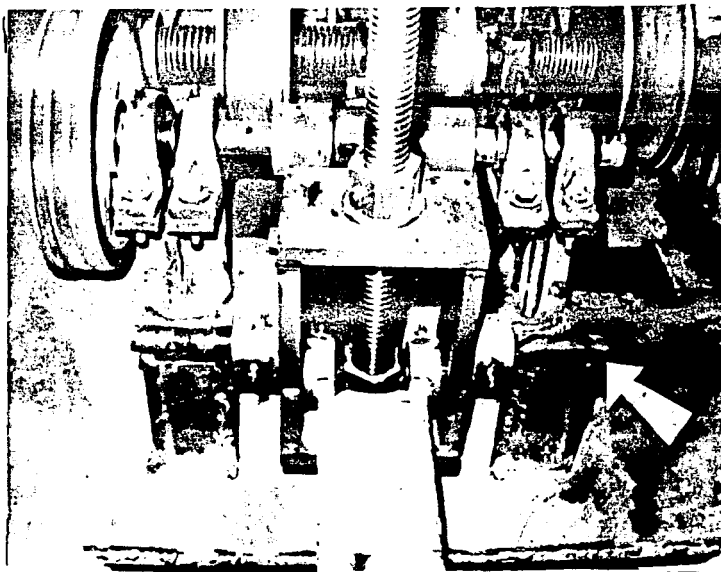


FIG. A-10 DETALLE DEL VOLANTE DE CONTROL DE  
DESPLAZAMIENTO

Se menciona que se gire el volante indiferentemente hacia la izquierda o derecha, ya que el sistema esta diseñado de tal manera que los desplazamientos que se tienen son simétricos, teniéndose un desplazamiento máximo en cualquiera de las dos posiciones en que se tenga el brazo de la placa de acero (en su parte más baja o más alta).

Como una observación en la operación de dicho volante se debe tener especial cuidado al girar el volante, ya que se puede llegar a tocar una placa de acero que sirve como base del sistema de movimiento, y al estar funcionando la mesa con esta posición del volante, producirá un golpe brusco entre el volante y la placa de base provocando se dañe el sistema de movimiento.

#### 6. Placa de Acero.

La mesa vibratoria está formada por una placa de acero de forma rectangular con dimensiones de 1.82 m X 3.01 m. Es en esta placa donde se colocan los modelos a escala de los cuales se estudian sus propiedades dinámicas.

Como un dato importante se proporciona el peso aproximado que soporta la mesa vibratoria para poder trabajar en óptimas condiciones, que es de 3 Ton.

Esto es una restricción importante, ya que limita de manera importante el peso del modelo a estudiar e implícitamente limita el tamaño de dicho modelo.

La placa de acero tiene un movimiento horizontal unidireccional que es producido por el eje excéntrico, dicho movimiento es transmitido a la mesa vibratoria por medio de un brazo que une al eje excéntrico con la placa de acero, ver fig. A-11. La mesa vibratoria tiene el tipo de movimiento que se mencionó anteriormente, debido a que se le adaptaron en su parte inferior una serie de baleros los cuales a su vez se apoyan en rieles de acero como los que se muestran en la fig. A-12.

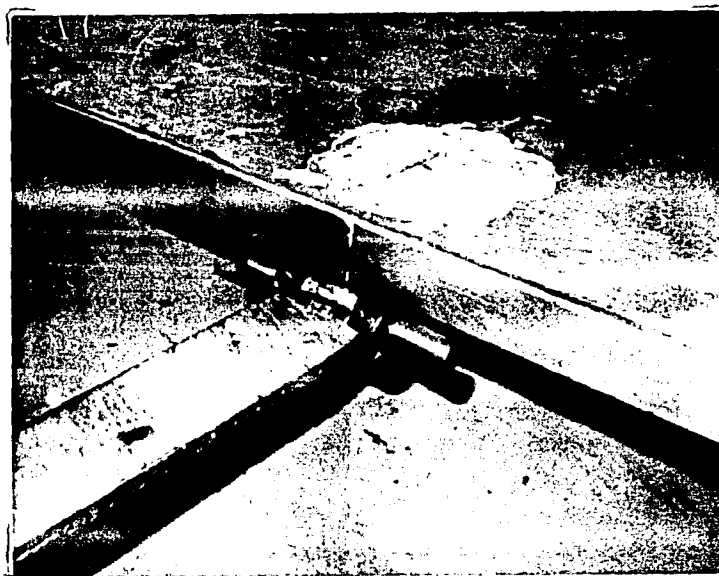


FIG. A-11 CONEXIÓN ENTRE EL EJE EXCÉNTRICO  
Y LA PLACA DE ACERO



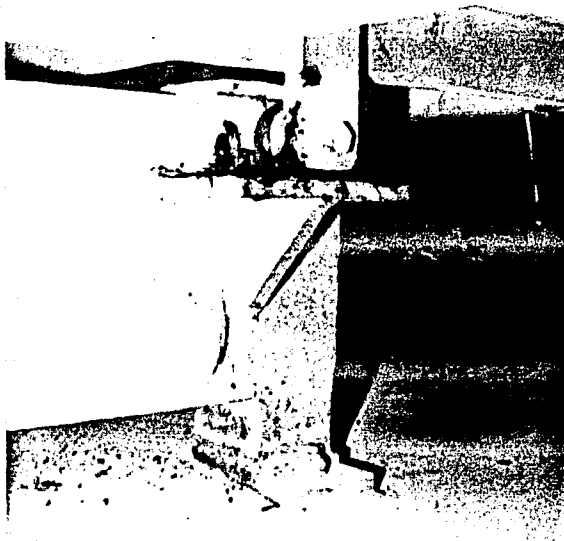


FIG. A-12 DETALLE DE APOYO DE LA PLACA DE ACERO

Como se mencionó al principio del presente apéndice, la mesa vibratoria es una maquina hechiza, y en consecuencia se desconocian las frecuencias y desplazamientos que se pueden obtener en la mesa. En lo que sigue se describe la forma en que se calibró la mesa vibratoria presentando sus correspondientes gráficas de calibración .

La calibración la realizó el M. en C. Neftali Rodriguez Cuevas, quien con un equipo de medición de características dinámicas, instrumento la mesa vibratoria de la siguiente forma :

Se fijaron dos acelerómetros en la mesa, colocados en su parte central, al principio y al final de la placa de acero. Estos acelerómetros se encontraban directamente conectados a un analizador de espectros que captaba la señal emitida por los acelerómetros, reproduciendo esta señal de tal forma de obtener los valores de frecuencias y densidades espectrales de aceleración como principales parámetros.

Una vez colocados los acelerómetros, se procedió a hacer girar el volante de control de desplazamiento de tal forma que se obtuvo un desplazamiento máximo; el valor de este desplazamiento fue de 19 mm. Este valor se mantiene constante durante toda la calibración.

Después de haber fijado el valor del desplazamiento máximo, se giró el volante de control de frecuencia en sentido horario, de tal forma de obtener un valor de frecuencia en la mesa vibratoria nulo (Cuando las bandas que unen las poleas se encuentran totalmente flojas). En el momento de tener esta condición se hizo una marca en el volante que indica la posición para la cual el valor de la frecuencia que se tiene es nulo, ver fig. A-13 (se puso la marca cuando se tenía las bandas flojas y se obtuvo registro de la frecuencia, según se aprecia en la curva de calibración que se presenta más adelante).

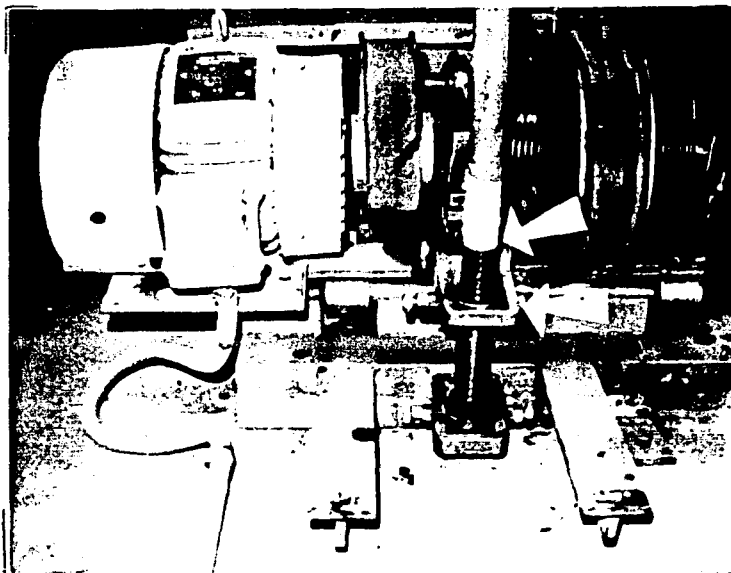


FIG. A-13 SEÑAL EN EL VOLANTE DE CONTROL DE FRECUENCIA

Se tiene un valor mínimo de la frecuencia, cuando la marca en la parte inferior del volante coincide con la entrada a una fuerza que se utiliza como punto de referencia y que se señala en la fig. A-13, esta condición se presenta cuando las dos flechas que se marcan en la figura coinciden en un mismo punto.

En la parte superior del volante también se hizo una marca, la que se utiliza como contador del número de vueltas que se proporciona al volante de control de frecuencia. Se debe verificar que cuando la marca en la parte inferior del volante esté exactamente en la entrada de la tuerca, la marca en la parte superior del volante debe estar orientada en dirección al este.

Una vez que se tienen las condiciones anteriores, se comienza a girar en sentido antihorario el volante de control de frecuencia en intervalos de 3 vueltas completas, en donde por medio de los aparatos de registro, se obtiene los valores de las frecuencias y densidades espectrales en cada uno de estos intervalos; se debe tener especial cuidado ya que los registros en cada intervalo se obtendrán una vez que se tiene un mínimo de 20 eventos de oscilación de la mesa, lo anterior se hace con el fin de normalizar el valor de la frecuencia y en esta forma obtener registros de mayor confiabilidad.

Con los datos que se tienen de frecuencia se trazan las gráficas de calibración de la mesa vibratoria en las que el eje de las abscisas corresponde al número de vueltas que se tiene en el volante de control de frecuencia y el eje de las ordenadas corresponde al valor de frecuencia de vibración que se tiene en la mesa, la gráfica se presenta en la fig. A-14.

Con la ayuda de esta gráfica se puede obtener el valor de la frecuencia que se tiene en la mesa vibratoria para cualquier posición del volante de control de frecuencia, al entrar en la gráfica con el valor del número de vueltas del volante e interceptar la curva correspondiente para así obtener el valor de la frecuencia de la mesa, se puede ver que el valor de la frecuencia de la mesa, depende únicamente del número de vueltas que se le hayan dado al volante a partir de la condición inicial.

Es importante señalar que la curva de calibración, corresponde a un valor de desplazamiento máximo constante. Esta condición se hizo por facilidad de manejo de la máquina y porque es éste un valor óptimo que nos proporciona la frecuencia de vibración adecuadas para el estudio de un gran número de modelos.

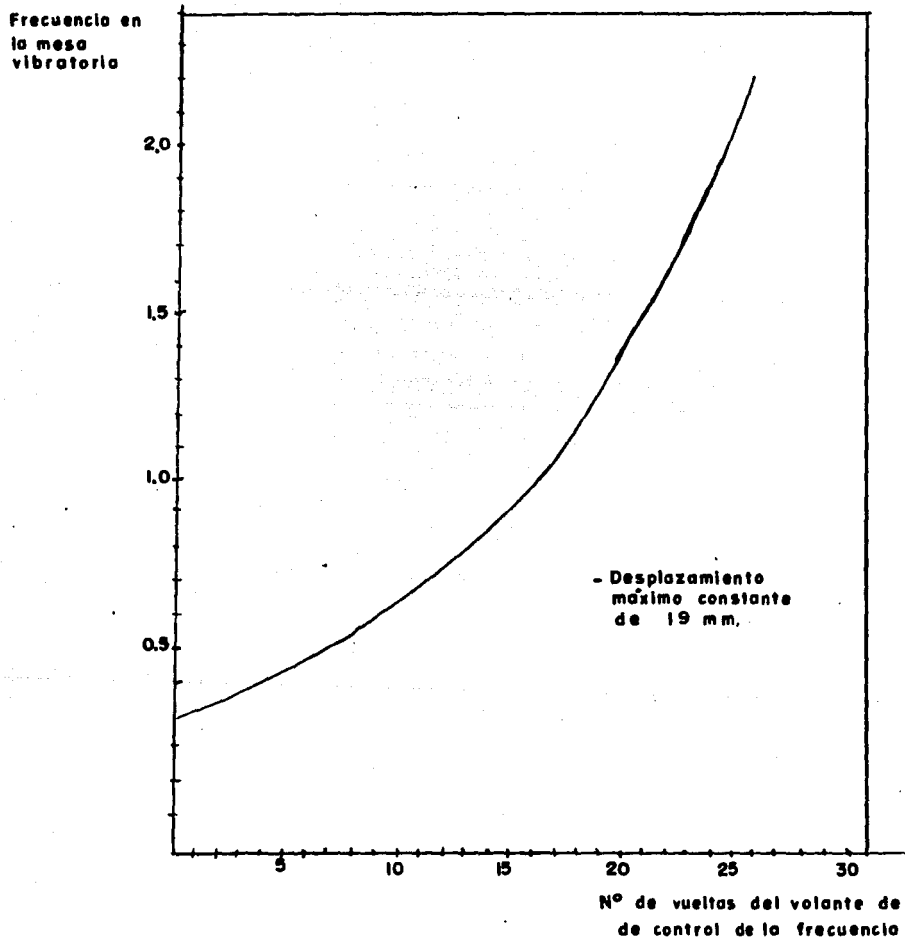


FIG. A-14 VARIACIÓN DE LA FRECUENCIA DE LA MESA VIBRATORIA

Así mismo, es de mencionarse que la curva de calibración mostrada, corresponde a una segunda calibración de la mesa vibratoria, ya que anteriormente se había realizado una primera calibración, pero debido a una descompostura en el sistema mecánico que proporciona el movimiento a la mesa, trajo como consecuencia un cambio total en algunas partes importantes de dicho sistema (básicamente en el eje excéntrico y el volante de control de desplazamiento). Se tuvo que realizar la calibración ya que no se mantuvieron las mismas condiciones de operación con las que se calibró la mesa en la primera ocaión.

Como un resumen de las características de la mesa se puede mencionar :

- La mesa vibratoria solo tiene movimiento en una dirección
- El movimiento es horizontal
  - El movimiento que produce la mesa vibratoria es de tipo senoidal
  - Se tiene como variables el valor de la frecuencia y el desplazamiento.