

ANÁLISIS vs. EXPERIMENTACIÓN: CORRELACIÓN DE ALGUNOS PARÁMETROS
ESTÁTICOS Y DINÁMICOS EN ESTRUCTURAS SOMETIDAS A ENSAYOS.

Carlos R. Llopiz
INVAP S.E.
S.C. de Bariloche - Argentina.

RESUMEN.

Este trabajo describe en forma muy breve algunas de las técnicas de experimentación utilizadas para la investigación en ingeniería sismorresistente. Se hace incapié en la necesaria complementación de los estudios analíticos y experimentales para la formulación de modelos matemáticos que puedan representar en forma racional el comportamiento real de estructuras y sus componentes ante acciones sísmicas. Se presentan algunos resultados analíticos y experimentales obtenidos dentro de un plan de investigación integrado.

ABSTRACT.

This paper describes very briefly some of the experimental techniques used in earthquake resistant engineering research. Attention is brought to the necessity of integrating analytical and experimental studies in order to achieve mathematical models capable of representing in a rational way the actual behavior of structures and their structural elements when subjected to seismic actions. Some preliminary analytical and experimental results from an integrated research program are also presented.

I. INTRODUCCIÓN.

En diseño sismo-resistente es conveniente expresar los requerimientos básicos a través de esta simple expresión:

$$\text{Demanda} \leq \text{Suministro} \quad (1)$$

entendiendo que en ambos miembros de esta ecuación quedan incluidas condiciones de rigidez, resistencia, capacidad de disipación de energía, tenacidad, etc.

Para lograr una estructura con un comportamiento satisfactorio ante acciones sísmicas el diseñador deberá predecir con buena aproximación ambos miembros de la expresión (1), para el o los estados límites que controlen el diseño.

Es obvio que el suministro depende de la demanda, pero el diseñador debe reconocer que también la demanda depende del suministro, es decir, las fuerzas a que se verá sometido el edificio durante un sismo dependen no solamente de las características del terremoto mismo sino también del estado en que el edificio se encuentra al momento del evento excitador. Dicho en otras palabras, al sismo le interesa cómo se encuentra el edificio, haciendo abstracción de cualquier sofisticación que pueda haber empleado el diseñador en su modelación matemática, pero sí interesando en términos de respuesta el buen diseño conceptual original, y además cómo se construyó, se conservó y se repararon daños que puedan haber ocurrido por eventos anteriores. Note que se habla de "edificio", siendo su "estructura" una parte de aquel.

A los efectos de este trabajo se omitirán mayores comentarios respecto a la importancia de las etapas de construcción, conservación y reparación de los edificios, no por menos importantes sino por limitar el alcance de esta presentación, la cual se remitirá a aspectos generales de diseño y correlación entre predicción analítica y experimentación.

Para la primer fase de las mencionadas como responsables en la generación de acciones inerciales sísmicas, es decir el diseño estructural, es importante entonces que el diseñador cuente con modelos confiables para una correcta predicción del comportamiento del edificio ante los diferentes niveles de excitación dinámica.

La posibilidad de suplementar los estudios analíticos con la realización en forma integrada, simultánea y recíproca, de estudios experimentales provee uno de los medios más efectivos de comprender en forma más racional el comportamiento, lineal y no lineal, de las construcciones ante eventos tan complejos como los terremotos. Esa mejor comprensión del fenómeno físico conducirá seguramente a mejorar progresivamente las herramientas de diseño y análisis estructural.

II. OBJETIVOS DE ESTA PRESENTACIÓN.

Este trabajo está dirigido fundamentalmente a:

- (i) poner énfasis en la necesaria integración del análisis con los experimentos, tal cual se realizó con el plan de investigación cooperativo entre Japón y Estados Unidos referido a Ingeniería Sismorresistente (1) (3).

(ii) hacer una breve referencia a algunos de los métodos de ensayos utilizados durante ese programa de investigación.

(iii) presentar algunos resultados preliminares de estos estudios, y establecer breves comentarios a la luz de las correlaciones entre los resultados analíticos y las mediciones experimentales.

III. DIFERENTES TÉCNICAS DE EXPERIMENTACIÓN.

Básicamente, de acuerdo a la manera en que se excita a la estructura o componente de la misma, los métodos de experimentación que se utilizan en investigación sismo-resistente quedan incluidos en alguno de los cuatro siguientes grupos:

1. ensayos estáticos.
2. ensayos cuasi-estáticos.
3. ensayos pseudo-dinámicos.
4. ensayos dinámicos.

III.1. ENSAYOS ESTÁTICOS.

La Fig. 1 indica esquemáticamente un caso típico de ensayo estático en el que la acción consiste en una carga P que se aplica en forma lenta y en un solo sentido [4]. Este tipo de ensayo se utiliza muy comúnmente para ensayo de elementos estructurales aislados (vigas, columnas, tabiques, etc.), como así también para determinar las características mecánicas de los materiales, es decir la definición de sus leyes constitutivas [5].

III.2. ENSAYOS CUASI-ESTÁTICOS.

Tal cual se indica en Fig. 2, es una sucesión de ensayos estáticos en los que existe reversión de cargas y/o deformaciones. Se obtiene valiosa información respecto del comportamiento histerético tanto a nivel de material, de elemento aislado o de estructura global. Correctamente instrumentado es de muy razonable aceptación para simular la naturaleza cíclica de las excitaciones dinámicas [6].

Este método constituye un importante avance respecto al método estático exento de reversiones, sin implicar con respecto a éste, grandes diferencias de costo para su implementación. Combinado con técnicas de modelación física, es decir implementado para el estudio de modelos de escala reducida, constituye una poderosa herramienta de investigación [7].

III.3. ENSAYOS PSEUDO-DINÁMICOS.

Esta denominación del método no dice mucho del mismo pues en realidad debería designarse como "sistema de ensayo con un computador en línea" [8]. Básicamente, el método combina una técnica experimental con análisis numérico, ambos realizados simultáneamente. Para explicar brevemente el método se puede referir a la Fig.3 :

- (i) la estructura se fija al suelo del laboratorio. Fig. 3.a.
- (ii) se instalan los gatos hidráulicos en cada nivel del edificio.
- (iii) se supone la estructura como un sistema de masas discretas y con posibilidad de deformación sólo en la dirección de aplicación de las cargas, por lo que el número de grados de libertad es igual

- (iv) al número de pisos del edificio. Fig. 3.b.
 la ecuación de equilibrio dinámico cuando la base de la estructura es sometida a una aceleración $\ddot{x}_g(t)$, que representa el registro de un acelerograma del terremoto perturbador, está dada por:

$$[M]\ddot{\{x_n\}} + [C]\dot{\{x_n\}} + \{fn\} = - [M]\{1\}\ddot{x}_g \quad (2)$$

donde $\ddot{\{x_n\}}$ y $\dot{\{x_n\}}$ representan los vectores de aceleración y velocidad del vector $\{x_n\}$ de desplazamientos del sistema discreto en el paso de resolución n de la ecuación de equilibrio (o sea para un tiempo t determinado). A su vez, $[M]$ y $[C]$ son las matrices de masa y amortiguamiento viscoso, siendo $\{fn\}$ el vector de fuerzas restitutivas del sistema.

Como método de integración directa se usa el método de la diferencia central, que es un método explícito, y con el cual se puede expresar el vector aceleración y el vector velocidad en el paso de integración n (tiempo t) en función de los vectores desplazamiento en los pasos $(n-1)$ y $(n+1)$, es decir en los tiempos $(t - \Delta t)$ y $(t + \Delta t)$:

$$\ddot{\{x_n\}} = \{x_{n+1}\} - 2\{x_n\} + \{x_{n-1}\} / \Delta t^2 \quad (3)$$

$$\dot{\{x_n\}} = \{x_{n+1}\} - \{x_{n-1}\} / 2\Delta t \quad (4)$$

Substituidos (3) y (4) en (2) resulta una ecuación en la que si se suponen conocidos todos los vectores para el paso n y $n-1$, es decir para los tiempos t y $(t - \Delta t)$, la única incógnita es el vector $\{x_{n+1}\}$, que viene dado por la siguiente expresión:

$$\{x_{n+1}\} = [K]^{-1} * \{F\} \quad (5)$$

donde:

$$[K] = [M] + (\Delta t/2) * [C] \quad (6)$$

y

$$\{F\} = 2*[M]*\{x_n\} + [(\Delta t/2)*[C] - [M]]*\{x_{n-1}\} - \Delta t^2*\{fn\} - \ddot{x}_g*\Delta t^2*[M]*\{1\}$$

El diagrama de flujo de la Fig. 3.c. explicita el procedimiento que se puede resumir así:

- (i) se supone estar en el paso n (tiempo t) de ensayo. Antes de este paso todo es conocido.
- (ii) usando la ecuación (5) se calcula el vector $\{x_{n+1}\}$, que da cuales son los desplazamientos a inducir en cada nivel de la estructura. Esta evaluación numérica se efectúa con el computador en línea.
- (iii) cargar a la estructura hasta alcanzar los niveles de desplazamiento evaluados en la operación anterior.
- (iv) medir las fuerzas restitutivas $\{f_{n+1}\}$ a través de las celdas de carga de los gatos hidráulicos.
- (v) hacer $t = t + \Delta t$ (o sea $n = n + 1$).
- (vi) comenzar nuevamente el proceso leyendo \ddot{x}_{n+1} del acelerograma.

Como ventajas del método se pueden mencionar las siguientes:

- * el computador en línea con el ensayo requiere poco espacio de memoria, ya que $[M]$ y $[C]$ se hacen normalmente diagonales.
- ** no es necesario realizar suposiciones para definir la matriz de rigi-

dez de la estructura, puesto que las fuerzas restitutivas se leen directamente de los gatos hidráulicos. Resulta entonces que el método es una poderosa herramienta cuando se analiza el comportamiento dinámico no lineal de las estructuras.

*** se puede mantener un control del comportamiento local y de propagación de daños de la estructura puesto que ésta es cargada en forma lenta (cuasi-estática).

III.4. ENSAYOS DINÁMICOS.

A este grupo pertenecen los ensayos cuyo objetivo, por ejemplo, es determinar las características dinámicas de una estructura, como pueden ser los períodos de vibración y el amortiguamiento, lo cual se logra a través de, por ejemplo, vibraciones libres, ambientales o forzadas (1) (6).

Ensayos dinámicos más complejos son los que se realizan fijando la base de la estructura a una mesa vibratoria y sometiendo a ésta a la acción de movimientos que puedan ser, por ejemplo, registros de acelerogramas de terremotos pasados. Con este tipo de experimentación se logra estudiar la respuesta de la estructura ante distintos niveles de excitación al tener la posibilidad de escalar la función dinámica excitadora a intensidades que llevan a la estructura a representar los diversos estados límites, por ejemplo, de servicio, de daño admisible y último o de colapso.

La gran ventaja de las experimentaciones sobre mesas vibratorias con respecto a los métodos anteriormente descritos es que las excitaciones externas se aplican no como una serie de fuerzas a nivel de cada piso de la estructura sino como un movimiento en la base del edificio, simulando más cercanamente la acción de los terremotos sobre las construcciones.

Por los costos involucrados en la construcción de laboratorios que permitan este tipo de ensayos dinámicos, los mismos sólo se realizan en un número muy limitado de países. Además, existen importantes costos relacionados con: (i) construcción de modelos que se ajusten a las leyes de similitud dinámica; (ii) instrumentación de la estructura a ensayar; (iii) complejos sistemas de recepción y procesamiento de los datos recibidos durante los ensayos; (iv) mantenimiento y puesta a punto de las instalaciones antes de efectuar los ensayos (shaking table tune-up).

Los ensayos sobre mesa vibratoria proveen un excelente medio para comprobar la efectividad de los programas de análisis estructural dinámico que deben predecir la respuesta estructural tanto en rango lineal como no lineal, aunque por lo general este tipo de ensayos de alta complejidad están más dirigidos a la investigación del comportamiento de edificios en el rango de gran inelasticidad (9). La Tabla I indica las facilidades y limitaciones de la mesa vibratoria de la Universidad de California, Berkeley.

Una de las limitaciones hasta ahora presentes en los ensayos sobre mesas vibratorias es la falta de simulación de los efectos de interacción suelo-estructura, ya que normalmente las estructuras a ensayar son empotradas en su base a la mesa vibrante. Se han realizado algunos intentos, según las metodologías presentes en Ref. (9), para excitar el sistema suelo-estructura en conjunto a través de la utilización de explosivos de alto poder. En dicha referencia se mencionan algunas ventajas y desventajas de las distintas técnicas usadas hasta la fecha, relacionadas con el uso de explosivos.

IV. PROGRAMA ANALÍTICO-EXPERIMENTAL ENTRE JAPÓN Y ESTADOS UNIDOS.

Uno de los programas más completos de investigación realizados a la fecha y que contempla la realización de estudios analíticos y experimentales en gran escala es el que corresponde al programa cooperativo de investigación referido a diseño y construcción sismo-resistente llevado a cabo entre Japón y EEUU (1),(2),(3),(5).

A continuación se describen brevemente algunas de las fases y resultados de este programa. Este trabajo sólo pretende hacer mención a algunos de los aspectos que reafirman las necesidades de estudios integrados descriptas anteriormente.

IV.1. ESTRUCTURAS INVOLUCRADAS.

A los efectos de llevar a cabo el programa de investigación citado, se diseñó y construyó en hormigón armado:

1. Un edificio en escala natural (prototipo), de 7 pisos, en los laboratorios pertenecientes al BRI, Instituto de Investigación ubicado en Tsukuba, New Town, Japón.

2. Un modelo escala 1/5, réplica del prototipo, en los laboratorios de la Universidad de California, Berkeley.

3. Un modelo escala 1/12, parte de la estructura del prototipo, en la Universidad de Standfor, Palo Alto, California.

y con posterioridad se diseñó y construyó en estructura compuesta de acero con entrepisos de hormigón armado:

4. un edificio en escala natural, de 6 pisos, en el BRI.

5. un modelo en escala 0.305, réplica del anterior, en la Universidad de California, Berkeley.

6. un modelo escala 1/12, parte de la estructura del prototipo, en la Universidad de Standfor.

IV.2. OBJETIVOS PRIMARIOS DEL PROGRAMA.

El objetivo básico de todo el programa cooperativo es el de mejorar las prácticas corrientes de diseño y construcción sismorresistente. Para alcanzar dicho propósito, se establecieron una serie de objetivos fundamentales, entre los cuales, y pertinente a esta presentación, está el referido a determinar la confiabilidad de los programas computacionales de análisis estructural, estáticos y dinámicos, rango lineal y no lineal, para predecir el comportamiento estructural bajo cargas estáticas, cuasi estáticas, pseudo-dinámicas y dinámicas, en los distintos estados límites.

IV.3. NECESIDAD DE ESTUDIOS ANALÍTICOS PRELIMINARES.

Los estudios analíticos comenzaron a realizarse con anterioridad a la construcción de los modelos, con el objeto de:

a. determinar si los diseños adoptados para las estructuras de los edificios prototipo de hormigón armado y de acero satisfacían los requerimientos del Código de Japón y de EEUU.

b. para establecer las dimensiones máximas de los modelos de hormigón armado y de acero que podían ser ensayados en la mesa vibratoria de Berkeley, vale decir, determinar los factores de escala de los modelos.

c. establecer los movimientos sísmicos críticos y el rango de intensidades de los mismos que llevarán a la estructura a los estados límites.

d. diseñar la instrumentación para el modelo, vale decir cantidad, distribución y sensibilidad de los elementos de medición.

e. determinar la confiabilidad de las predicciones analíticas de la respuesta sísmica obtenida mediante el uso de los mejores programas de análisis estructural disponibles en Japón y Berkeley.

IV.4. BREVE DESCRIPCIÓN DE LAS ESTRUCTURAS ENSAYADAS.

IV.4.1. ESTRUCTURA DE HORMIGÓN ARMADO.

En la dirección longitudinal o de ensayo posee tres líneas estructurales. Las líneas exteriores son pórticos dúctiles, de cuatro columnas de igual dimensión, y con sección constante en toda la altura del edificio. La línea estructural central posee en su parte media un tabique estructural de sección rectangular con incremento de sección en los bordes. Este elemento, dadas sus características de rigidez y resistencia controla la respuesta global del edificio.

La Fig. 4 indica en planta y elevación la disposición de los elementos estructurales en el edificio de hormigón armado sometido a ensayos.

IV.4.2. ESTRUCTURA DE ACERO.

Con una filosofía de diseño similar al edificio de hormigón armado, la estructura del edificio de acero cuenta, según la dirección de aplicación de las cargas o dirección de ensayo, con dos líneas exteriores de pórticos dúctiles y resistentes a momentos, mientras que la línea central posee uno de sus vanos rigidizado con diagonales concéntricas, las cuales fueron substituidas por barras excéntricas durante la segunda fase de la experimentación (ver Fig. 8.c.). Las nueve columnas de la planta, cuyas secciones cambian con la altura, definen una planta estructural cuadrada y regular. Los entrepisos son de construcción compuesta de acero y hormigón armado alivianado (ver Fig. 8.a.).

La Fig. 5 indica un esquema de planta y elevación de la estructura del edificio de acero.

V. DESCRIPCIÓN DE ALGUNOS ENSAYOS.

V.1. ENSAYOS ESTÁTICOS.

V.1.1. ENSAYOS PARA DETERMINAR CARACTERÍSTICAS MECÁNICAS DE LOS MATERIALES.

En la Fig. 6 se pueden observar curvas de tensión-deformación obtenidas a partir de ensayos estáticos sobre probetas de hormigón y de acero que permitieron obtener información para lograr una correcta simulación de las propiedades de los materiales del prototipo, como así tam-

dién para contar con datos realísticos sobre leyes constitutivas a ser utilizadas en los estudios analíticos.

V.1.2. ENSAYOS PARA DETERMINAR MATRICES DE FLEXIBILIDAD DE LAS ESTRUCTURAS.

Para determinar en forma experimental la matriz de flexibilidad de las estructuras, éstas eran cargadas a nivel de cada entrepiso, uno por vez, por medio de una viga de acero suficientemente rígida, y con un dispositivo según se ilustra en Fig. 7.

Dos cables de acero eran traccionados entre la viga rígida y el piso del laboratorio. La viga metálica era sostenida por dos columnas metálicas fijadas al piso. Dicha viga hacía contacto con el modelo en las columnas exteriores de los modelos, a la altura de los entrepisos, y allí se colocaban celdas de carga para cada pórtico, como así también otras celdas de carga se incluían en los cables que en tracción transmitían la acción a la viga horizontal.

Como instrumentación se colocaban extensómetros eléctricos en cada pórtico y en cada nivel, como así también en la fundación para corregir los coeficientes de flexibilidad obtenidos.

Las predicciones analíticas fueron llevadas a cabo mediante el programa SAP-80 (12). Estos estudios analíticos tenían como objetivos, además de la verificación de la modelación matemática, establecer los valores máximos de carga que se podían aplicar sin producir deformaciones permanentes; definir la sensibilidad de los extensómetros y celdas de carga y el rango de calibración de los mismos.

V.2. ENSAYOS CUASI-ESTÁTICOS.

Como experimentos de apoyo a los ensayos dinámicos del edificio de acero, y con el objeto de conocer el comportamiento del sistema de entrepisos del modelo de acero, se llevaron a cabo una serie de ensayos sobre componentes losa-viga-columna que incluyeron reversión de cargas y deformaciones. La Fig. 8 indica los componentes del sistema de entrepisos del modelo escala 0.306, y en la Fig. 9 se muestra una de las respuestas experimentales obtenidas (envolvente de varios ciclos de cargas). La descripción detallada con resultados y conclusiones para esta serie de ensayos está en Ref. (10).

V.3. ENSAYOS DINÁMICOS.

V.3.1. ENSAYOS DE VIBRACIÓN LIBRE.

En este caso la estructura es desplazada de su posición vertical por un único cable amarrado al pórtico central y fijado al piso del laboratorio. En ese cable de acero se incluyó una barra de acero corta y de pequeño diámetro la que es bruscamente cortada después de lo cual el modelo inicia su respuesta dinámica transitoria.

En cuanto a instrumentación, se agregaron a los extensómetros utilizados para el ensayo anterior, acelerómetros en varios niveles. Se registraba la respuesta (desplazamientos y aceleraciones) en el tiempo por unos 10 segundos, y de los registros se podían determinar el periodo de vibración fundamental y la cantidad de amortiguamiento. La Fig. 10a muestra uno de los registros obtenidos para un extensómetro. Además, por aplicación de la transformada rápida de Fourier al registro de acelera-

ciones se podían determinar además las frecuencias de vibración de los modos superiores tal cual se muestra en Fig. 10.b.

V.3.2. ENSAYOS DE VIBRACIÓN FORZADA.

Se colocó en la losa superior de los modelos una pequeña mesa vibratoria a la cual se le agregó masa adicional para incrementar su acción dinámica sobre las estructuras a ensayar. Se conocían a través de predicciones analíticas y de ensayos anteriores los valores de las primeras frecuencias naturales de vibración. Basados en esos resultados, se hacía generar con la pequeña mesa vibratoria una señal de tipo sinusoidal con frecuencias cercanas a las naturales ya estimadas. A través del registro de la respuesta de la estructura, controlada por extensómetros y acelerómetros, se podía entonces obtener, mediante vibración forzada, las frecuencias naturales correspondientes a la estructura excitada.

V.3.3. ENSAYOS DE VIBRACIÓN AMBIENTAL.

Para este ensayo se colocaban dos sismómetros muy sensitivos a lo largo de los pórticos exteriores en la losa superior de la estructura. Los sismómetros medían la respuesta del edificio a la vibración ambiental en términos de velocidad, la cual era suministrada instantáneamente a un analizador espectral de Transformada de Fourier el cual generaba el espectro correspondiente a la historia de velocidades registrada por los sismómetros. La Fig. 21 muestra uno de los espectros de Fourier obtenidos por registros de vibración ambiental.

V.3.4. ENSAYOS SOBRE MESA VIBRATORIA.

En la Fig. 12 se muestran algunos de los acelerogramas que fueron utilizados para excitar las estructuras de hormigón armado y de acero. Las amplitudes de las aceleraciones de estos registros fueron apropiadamente escaladas para simular terremotos de variable intensidad, de acuerdo a los niveles de excitación que se correspondan con los estados límites de las estructuras analizadas. Se comenzaron los ensayos con aceleraciones muy pequeñas, las cuales fueron progresivamente creciendo hasta alcanzar valores de aceleraciones destructivas (> 0.40 g). Después de cada ensayo dinámico se hacía una evaluación de los daños, como así también se determinaban las características dinámicas, periodo y amortiguamiento, para lo cual se hacía un registro de la respuesta a vibración libre. Estas mediciones post-ensayo daban una idea del grado de daño global que la estructura sufría después de cada ensayo dinámico.

VI. RESULTADOS DE ALGUNOS ENSAYOS. CORRELACIÓN CON EL ANÁLISIS.

VI.1. ENSAYOS ESTÁTICOS.

La Tabla II muestra, a modo de ejemplo, una de las columnas de la matriz de coeficientes de flexibilidad para la estructura del modelo de acero escala 0.305. Se muestran los coeficientes para los distintos estados durante la construcción del modelo. De las últimas dos columnas de dicha tabla se puede establecer una comparación entre resultados analíticos y los obtenidos experimentalmente. Si bien estos resultados deben ser tomados como preliminares (para resultados finales se debe consultar Ref.[11]), se observa que en una primera estimación las diferencias entre análisis y experimentación oscilan entre un 5 % para los niveles superiores a un 15 % para los inferiores.

VI.2. ENSAYOS ESTÁTICOS vs. ENSAYOS DE VIBRACIÓN. CORRELACIÓN CON ANÁLISIS.

La Fig. 13 indica un modelo matemático de muy rápida aplicación que puede ser efectivamente aplicado para comparar resultados referidos al periodo fundamental de vibración de las estructuras ensayadas, a través de datos provenientes de:

- (i) ensayos estáticos, para definir la fuerza necesaria a aplicar en un nivel equivalente a los $2/3$ de la altura total del edificio, y que provoque en ese nivel un desplazamiento unitario. Puede tomarse ese valor de fuerza como equivalente a la rigidez K para aplicar en el cociente de Rayleigh en la determinación del periodo fundamental de vibración. La masa M se puede calcular por consideraciones analíticas, a partir de la evaluación de los pesos por nivel.
- (ii) ensayos de vibración libre, ambiental y forzada, desde donde se pueden obtener las frecuencias naturales.
- (iii) estudios analíticos, para lo cual se utilizó el código SAP-80 en la determinación de autovalores y autovectores.

En la Fig. 14 a 16 se establecen las comparaciones entre los valores del periodo fundamental de vibración para tres de las estructuras ensayadas. Se puede apreciar que los resultados obtenidos por las tres vías diferentes se asemejan bastante.

VI.3. ENSAYOS DINÁMICOS.

VI.3.1. ESTRUCTURA DE HORMIGÓN ARMADO.

En la Fig. 17 se condensan los resultados que corresponden a la respuesta global de la estructura de hormigón armado, y que contiene:

- (i) requerimientos del código americano U.B.C.
- (ii) estimaciones de resistencia global de la estructura a través de análisis plástico límite.
- (iii) análisis no lineal elástico.
- (iv) análisis no lineal dinámico.
- (v) resultados experimentales.

Detalladas conclusiones se mencionan en Ref. [3] respecto a estos resultados. Es conveniente mencionar a los efectos de esta presentación que los modelos matemáticos, tanto de análisis límite, como de análisis estático y dinámico no lineal, se fueron ajustando y mejorando a la luz de los resultados experimentales obtenidos. Está fuera del alcance de esta presentación una discusión detallada de los resultados, que por otra parte se desarrollan en las referencias citadas.

VI.3.2. ESTRUCTURA DE ACERO.

La Fig. 18 muestra algunos de los resultados analíticos y experimentales obtenidos para las estructuras del prototipo y del modelo 0.305 de acero. Se desea ilustrar la manera en que pueden realizarse las comparaciones entre los estudios analíticos y los resultados de los ensayos.

En la Fig 19 se muestra también para las estructuras de acero, la demanda del código UBC (Uniform Building Code), el espectro de res-

puesta elástica para el terremoto de Miyagi-Oki (Japón 1978) para 5 % de amortiguamiento, y las resistencias medidas en el prototipo y el modelo para el rango de periodos que correspondió a los ensayos. En Ref. [11] se efectúa una amplia discusión de los resultados.

VII. CONCLUSIONES.

La verificación de los resultados analíticos a través de la correlación con las mediciones experimentales constituye uno de los medios más confiables para el mejoramiento de la modelación de las estructuras sometidas a acciones sísmicas. Métodos simples de ensayos como el de carga estática monotónica y el que además incluye reversiones de desplazamiento pueden proveer valiosa información tanto sobre el comportamiento aislado de los elementos estructurales, como así también de la estructura toda.

El uso de modelos a escala reducida provee además la alternativa de ensayar estructuras que en escala natural, por razones de economía, limitaciones de tamaño y elementos de aplicación de cargas, serían imposibles de llevar a cabo. Sin embargo, al trabajar con modelos en escala reducida, especial atención debe prestarse a la correcta simulación de: (i) materiales; (ii) conexiones; (iii) fuerzas gravitatorias e inerciales; (iv) aplicación de cargas; y además todo lo relacionado con la instrumentación de los modelos.

En general, los programas que existen para análisis dinámico proveen adecuados resultados en el rango de comportamiento lineal, es decir para el rango de cargas en estado de servicio y cercano al de daños admisible. Sin embargo, se necesita un mejoramiento de la modelación matemática para predecir el comportamiento, en especial para estructuras de hormigón armado, en rango francamente no-lineal, en las cuales se requiere investigación, entre otros aspectos, sobre: (i) efecto de la contribución de las losas en la rigidez y resistencia de las vigas que la soportan; (ii) efecto de las cargas axiales en la rigidez y resistencia de los elementos verticales, tales como columnas y tabiques; (iii) efectos tridimensionales (como es el tan importante efecto de la interacción de líneas estructurales perpendiculares). Estos aspectos y muchos otros, solo pueden implementarse en los programas de análisis estructural una vez reconocido el verdadero fenómeno físico, para lo cual la realización de estudios analíticos y experimentales integrados, y que contemplen una secuencia basada en "análisis-experimentos-análisis", resultan de gran eficacia y confiabilidad.

REFERENCIAS.

- [1]. F.A. Charney y V.V. Bertero, "An Evaluation of the Design and Analytical Seismic Response of a Seven-Story Reinforced Concrete Frame-Wall Structure". Report No. UBC/EERC-82/08. Universidad de California, Berkeley.
- [2]. V.V. Bertero et al., "Mechanical Characteristics of Materials used in the 1/5 Scale Model of the 7-Story Reinforced Concrete Test Structure". Report No. UCB/EERC-83/21. Universidad de California, Berkeley.
- [3]. V.V. Bertero et al., "Earthquake Simulation Tests and Associated Studies of a 1/5 Scale Model of a 7-Story Reinforced Concrete Test Structure". Report No. UCB/EERC-84-05. Universidad de California, Berkeley.
- [4]. C.R. Llopiz "Estudios Analíticos y Experimentales Sobre un Modelo de Tabique de Hormigón Armado en Escala Reducida". Informe Interno. Comisión Nacional de Energía Atómica. Enero 1987. Buenos Aires.
- [5]. V.V. Bertero y C.R. Llopiz, "US-Japan Cooperative Earthquake Research Program: Progress report on Materials, Member Fabrication and Construction of a 0.305 Scale Model of a 6-Story Steel Test Structure". Universidad de California, Berkeley.
- [6]. R. Park, "Diseño Sísmico de Estructuras de Hormigón Armado". Curso dado en la Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas de la Universidad de Chile. Publicación SES D 1/86 (215). Chile 1986.
- [7]. P.D. Moncarz y H. Krawinkler, "Theory and Application of Experimental Model Analysis in Earthquake Engineering". Report No. 50. The John A. Blume EEC. Departamento de Ingeniería Civil. Universidad de Stanford. Junio 1981.
- [8]. S. Okamoto et al., "Techniques for Large Scale Testing at BRI Large Scale Structure Test Laboratory". Building Research Institute- Ministry of Construction. Japan - 1983.
- [9]. "Experimental Research Needs for Improving Earthquake-Resistant Design of Buildings". EERI. Report No. 84-01. Berkeley. California. Enero 1984.
- [10]. V.V. Bertero, C. R. Llopiz y C. Uang, "US-Japan CERP: Progress report on Cyclic Component Tests of the Composite Girders Used in the 0.3 Scale Model of a 6-Story Braced Steel Structure". Universidad de California, Berkeley.
- [11]. V.V. Bertero, C. Llopiz, C. Uang, K. Igarashi y A. Whittaker, "US-Japan CERP: Progress report on the Earthquake Simulation Tests and Associated Studies of a 0.3 Scale Model of the 6-Story Steel Test Structure". Universidad de California, Berkeley.
- [12]. E.L. Wilson, "SAP-80 Series of Programs". University of California Berkeley.

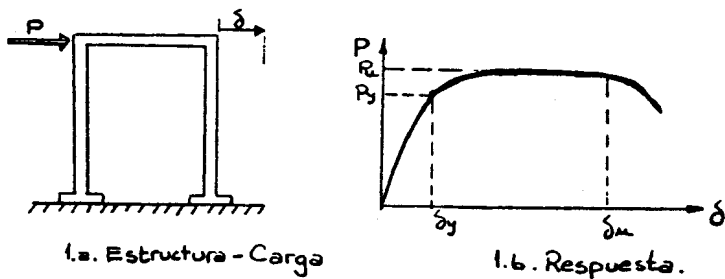


Fig 1- Esquema de Ensayo Estático.

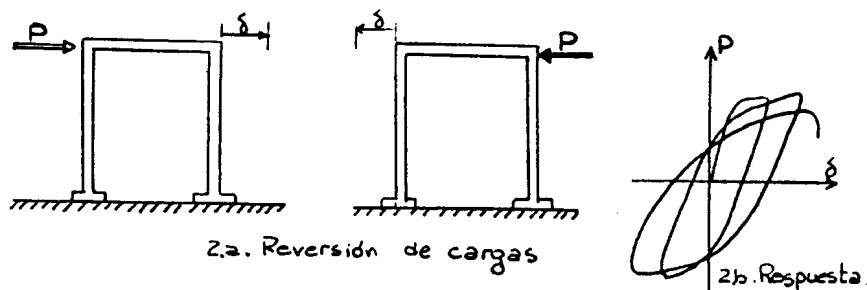
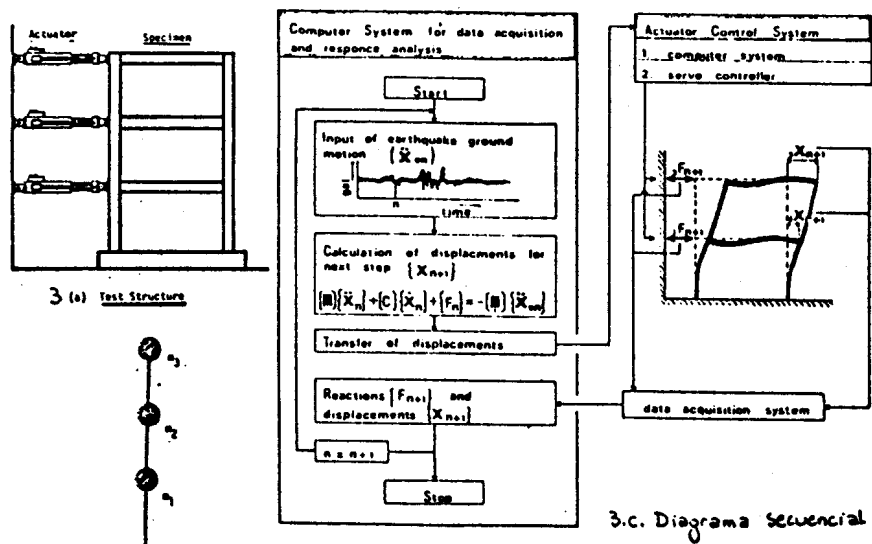


Fig 2- Esquema de Ensayo Cuasi-estático



3.b) Equivalent Mass System

Fig 3. Representación Esquemática del Ensayo Pseudo-Dinámico.

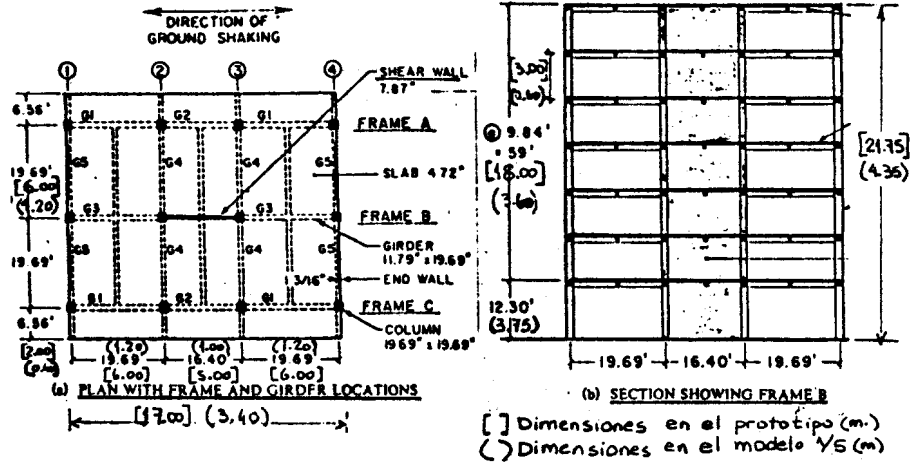


Fig. 4-Estructura del Edificio de Hormigón Armado.

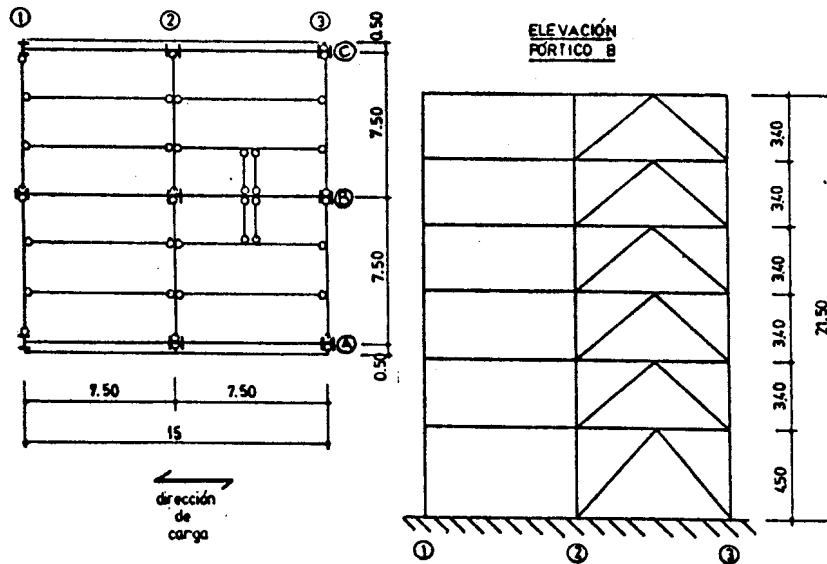


Fig. 5 EDIFICIO DE ACERO- ESTRUCTURA DE ENSAYO

dimensiones [en metro=prototipo. 1:1
 [en pie =modelo Esc. 0.305

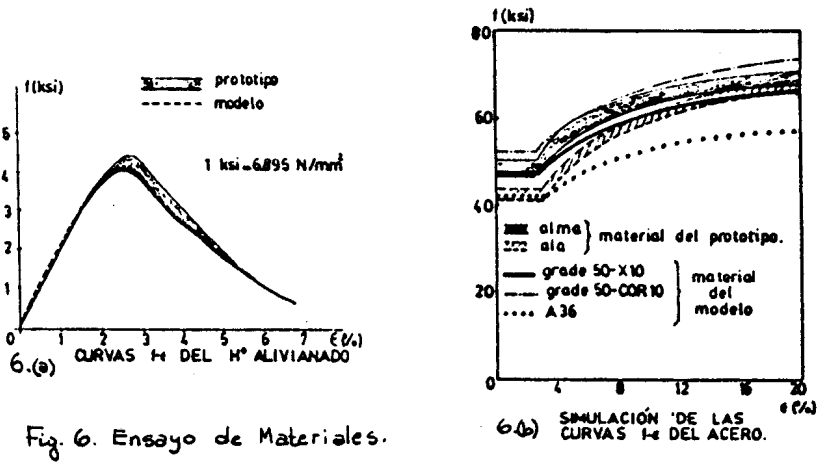


Fig. 6. Ensayo de Materiales.

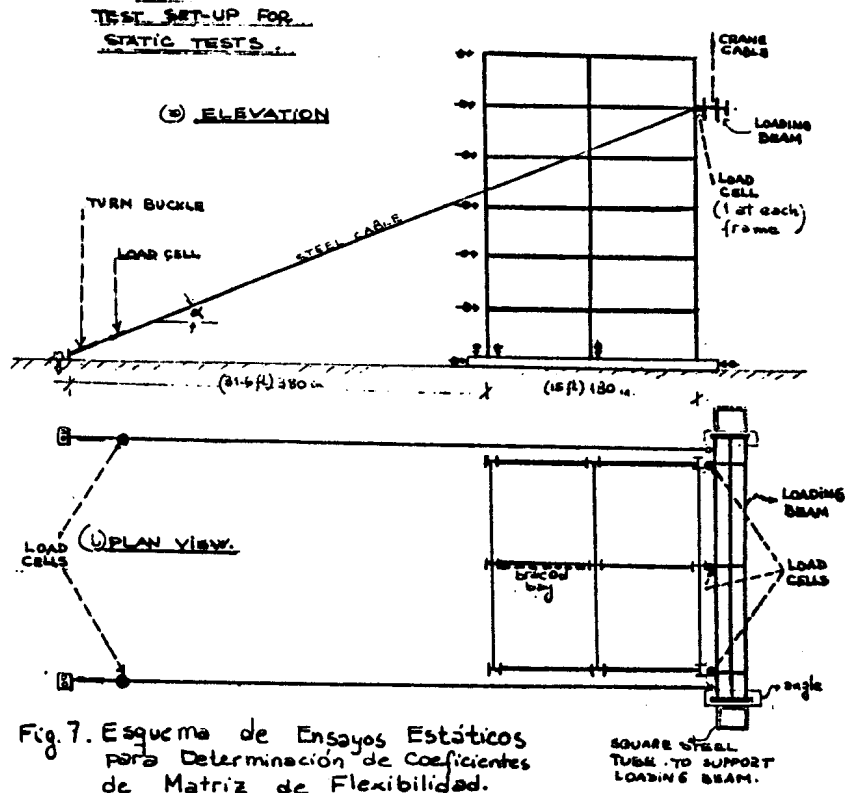
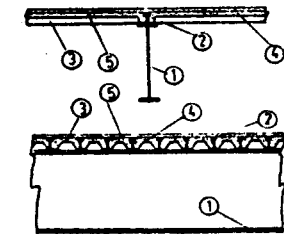
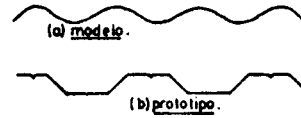


Fig. 7. Esquema de Ensayos Estáticos para Determinación de Coeficientes de Matriz de Flexibilidad.



- ① viga de acero.
- ② conectores de corte.
- ③ chapa de metal corrugada.
- ④ hormigón aliviado.
- ⑤ malla de acero.

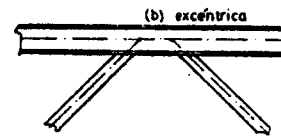
8.a. SISTEMA ESTRUCTURAL DE LOS ENTREPISOS



8.b. FORMA DE LA CHAPA METÁLICA DE LOS ENTREPISOS.



(a) concéntrica K



(b) excéntrica

8.c. SISTEMAS DE DIAGONALIZACIÓN

Fig. 8 - Entrepisos del Modelo de Acero esc. 0.305.

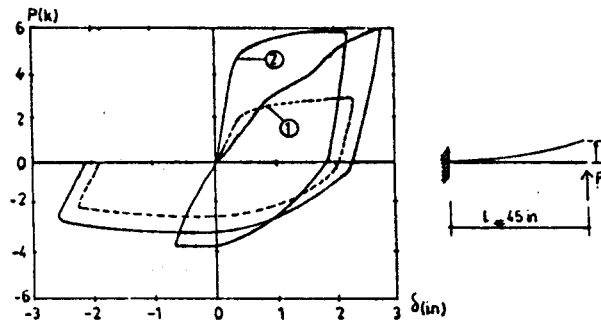
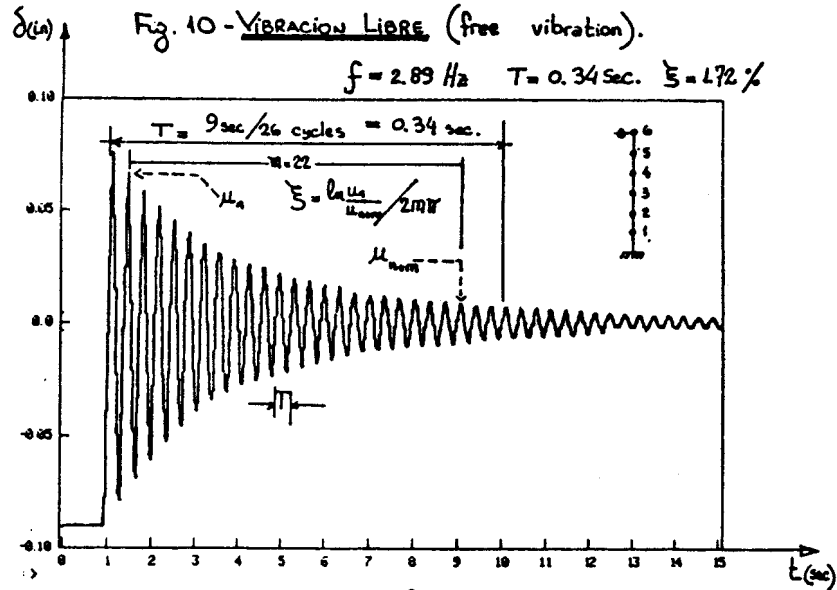


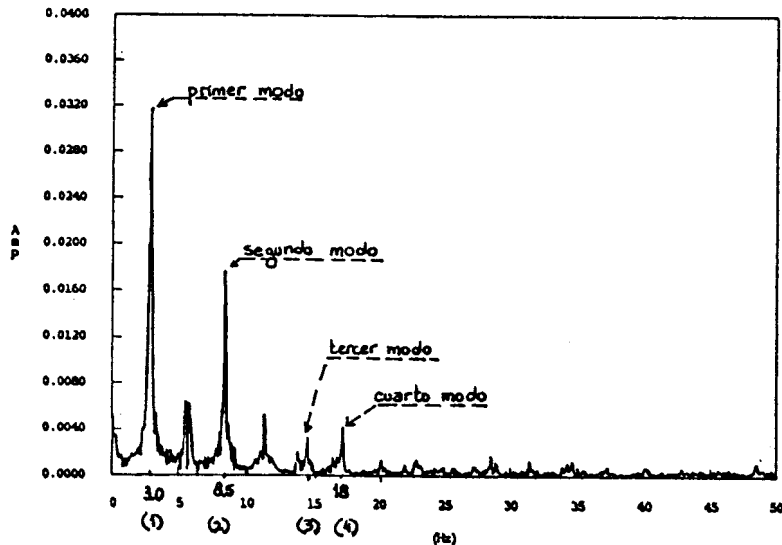
Fig 9 COMPORTAMIENTO CÍCLICO DE { VIGA DE ACERO ———— ①
ENTREPISO COMPUESTO. - - - - - ②



LVDT - Frame B - sixth-floor

10.a. Respuesta en desplazamientos a Vibración Libre.

Fourier Spectrum on Free Vibration with lead (Acc of 6F frame A)



10.b. Espectro de Fourier de Registro de Aceleraciones

Ambient Test on Longitudinal Direction with Lead (Run 1 Ch 1)

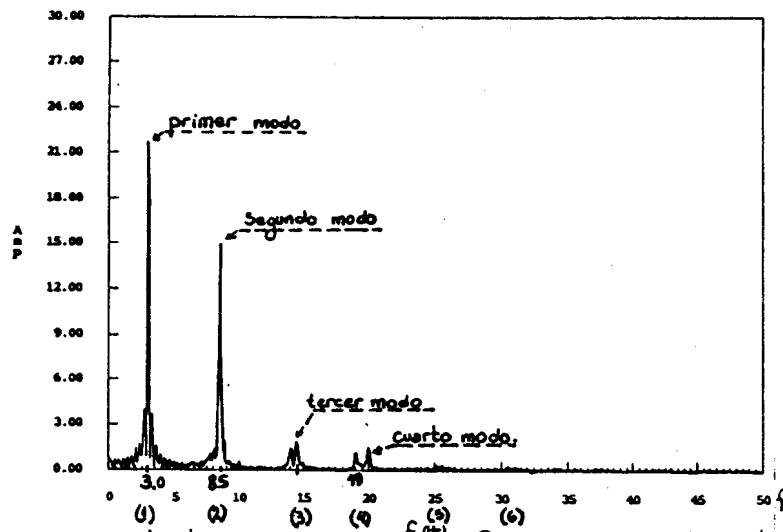


Fig. 11. Análisis de Frecuencias - Resultados de Vibración Ambiental.

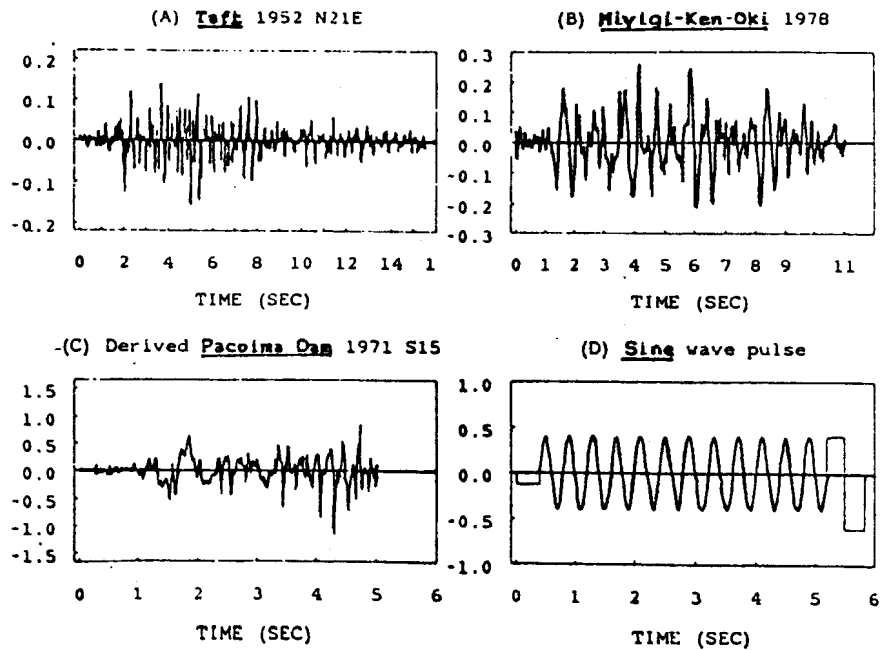


Fig 12. Registros de Aceleraciones input para ensayos Dinámicos en modelos de H²A³ y Acero.

DEFINICION DE CARACTERÍSTICAS DINÁMICAS DE LA ESTRUCTURA - 19.4.1

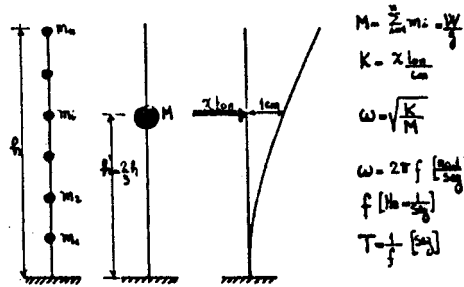


Fig. 13

PROTOTIPO DE HORMIGÓN ARMADO

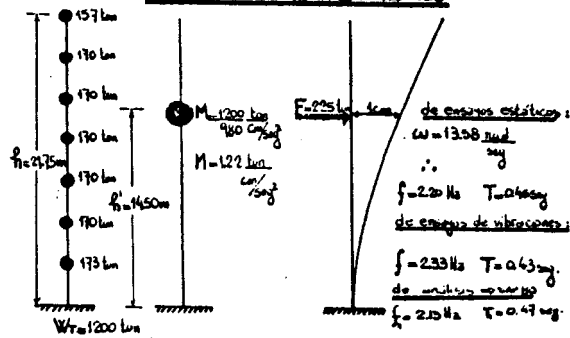


Fig. 14

MODELO ESC. 1/5 - DE H^o A^o

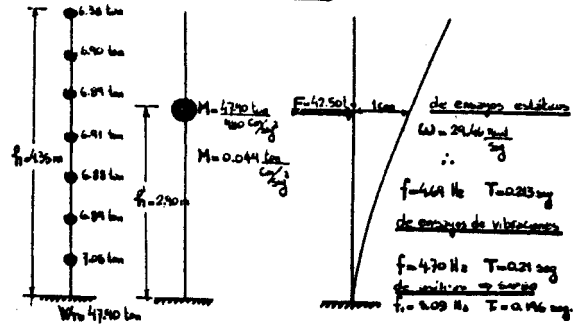


Fig. 15

MODELO ESC. 1/328 - BARRAS DE ACERO

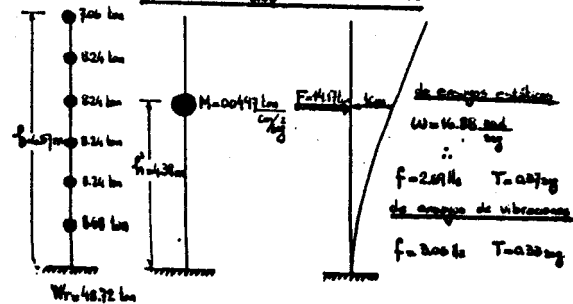


Fig. 16

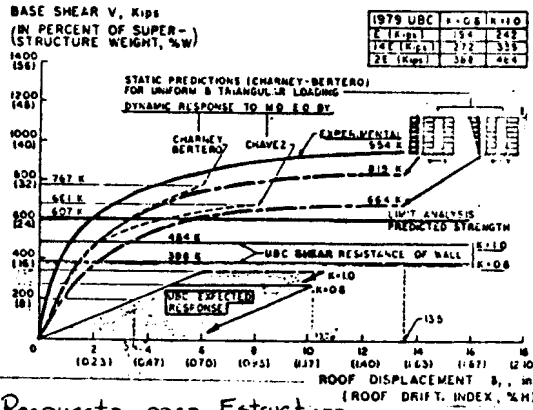


Fig 17. Respuesta para Estructura de Hormigón Armado.

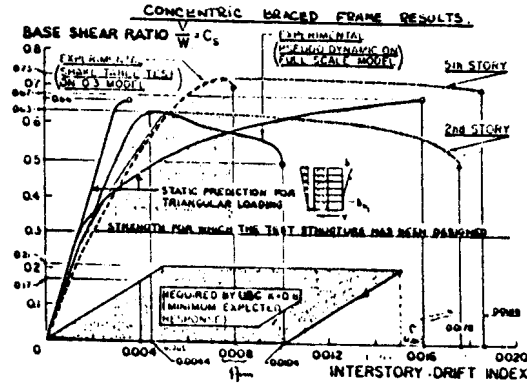


Fig 18. Respuesta para Estructura de Acero.

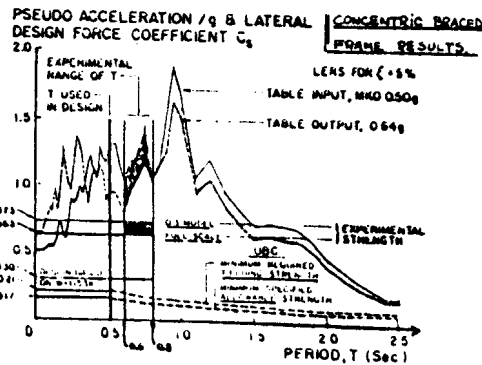


Fig 19. Correlación Espectral para Estructuras (modelo y Prototipo) de Acero.

TABLA N° 1

LIMITACIONES DE LA MESA VIBRATORIA DE BERKELEY	
dimensiones máximas de la estructura a ensayar	en planta 6x6 m.
	en altura 10 m.
desplazamientos máximos	horizontal : 15 cm
	vertical : 5 cm
aceleraciones máximas	horizontal 75 % g
	vertical 50 % g

1 kip = 4.45 KN.

1 in = 2.54 cm.

TABLA N° 2

RESULTADOS PRELIMINARES DE ENSAYOS ESTÁTICOS Y DE VIBRACIONES SOBRE EL MODELO DE ACERO ESCALA 0.305. CARGA UNITARIA = 1 TON. APLICADA EN NIVEL 6 - δ_{16} (cm)

	PÓRICO B SIN DIAG.	PÓRICO B Y BIELA K	ESTRUCTURA CON LOBA	PREDICCIÓN ANALÍTICA.	ESTRUCTURA CON R. AUX.
δ_{16}	2.188	0.250	0.154	0.143	0.151
δ_{12}	1.725	0.200	0.118	0.106	0.112
δ_{8}	1.247	0.136	0.085	0.073	0.080
δ_{4}	0.864	0.099	0.057	0.049	0.056
δ_{2}	0.533	0.061	0.038	0.029	0.034
δ_{1}	0.234	0.030	0.020	0.0135	0.017
FRECUENCIAS CÍCLICAS f (HZ) Y PERÍODOS T (SEG) DETERMINADOS EXPERIMENTALMENTE EN EL MODELO DE ACERO					
f	5.12	15.60	5.65	6.21	3.06
T	0.195	0.064	0.18	0.16	0.33

