

Título: “Desarrollo de una estación de ensayos dinámicos para modelos de estructuras de obras civiles”

Ing. Jorge E. JAZNI¹

Ing. Mario A. NIETO²

Ing. Javier E. SALOMONE³

Ing. Gonzalo M. AIASSA⁴

Resumen :

Este proyecto se realizó mediante un convenio marco y otro específico de cooperación entre la Facultad Regional Córdoba (U.T.N.) y el Instituto Universitario Aeronáutico y consistió en el desarrollo de una estación de ensayos dinámicos aplicable a cualquier tipo de estructuras.

La inserción en los últimos cursos de la carrera de Ingeniería Civil de asignaturas relacionadas con estructuras sismorresistentes generó la necesidad de equipar laboratorios con bancos de ensayos útiles para la realización de las prácticas correspondientes.

Así es que se diseñó, calculó, construyó, ensayó y evaluó el dispositivo con resultados altamente satisfactorios.

El mismo consiste en una placa rígida dotada de un sensor de velocidad con un único grado de libertad según el plano horizontal la que desliza sobre cuatro guías con una capacidad de carga másica de 100 Kg.

El accionamiento es producido con un motor asíncrono que conduce un mecanismo biela-manivela a través de una transmisión de poleas y correas que permiten seleccionar velocidades de rotación del árbol conducido. De este modo la frecuencia de excitación del ensayo puede ser variada desde 3 a 100 Hz mediante un controlador de velocidad del motor de accionamiento. Las amplitudes de desplazamiento de la excitación puede ser regulada manualmente entre 0 y 1mm via un dispositivo de excéntricas.

El mecanismo biela-manivela posee una relación longitud de biela versus radio de manivela lo suficientemente elevada de manera que pueda considerarse a los desplazamientos de la placa como sinusoidales.

¹ Ing. Mecánico Electricista. Esp. en Docencia Universitaria. C.U.D.A.R. (Centro Universitario de Desarrollos en Automación y Robótica) Prof. Asoc. en Proyecto de Máquinas-Ing. Mec.Ele-FCEFy N UNC. Prof. Adj en Electrónica y Sistemas de Control-Ing.Mecánica -UTN FRC

² Ing. en Construcciones - Ms. en Docencia Universitaria. G.I.I.I.(Grupo de Investigación en Informática para Ingeniería) – UTN FRC. Prof. Asoc. en Dinámica Estructural-Ing.Civil-UTN FRC

³ Ing. Mecánico. G.I.I.I.(Grupo de Investigación en Informática para Ingeniería) UTN FRC. Prof. Adj. en Fabricación Flexible-Ing.Industrial-UTN FRC

⁴ Ing. Civil. G.I.I.I.(Grupo de Investigación en Informática para Ingeniería) – UTN FRC. Aux Doc. en Dinámica Estructural-Ing.Civil-UTN FRC

INTRODUCCIÓN

Este proyecto se realizó mediante un convenio marco y otro específico de cooperación mutua entre la Universidad Tecnológica Nacional – Facultad Regional Córdoba y el Instituto Universitario Aeronáutico y contempló el desarrollo de una estación de ensayos dinámicos aplicable a cualquier tipo de estructuras.

La inserción en las currículas en los últimos cursos de las carreras de Ingeniería Civil de las asignaturas relacionadas con estructuras sismorresistentes generó la necesidad de equipar laboratorios con bancos de ensayos útiles para la realización de las prácticas correspondientes.

Los elevados costos de estos equipamientos, sumados a los magros presupuestos universitarios generaron la idea de materializar el presente proyecto.

Así es que se diseñó, calculó, construyó, ensayó y evaluó el dispositivo con resultados altamente satisfactorios.

El mismo consiste en una placa rígida móvil, sobre la que se monta la estructura a ensayar, con un único grado de libertad según el plano horizontal la que desliza sobre cuatro guías cilíndricas conformadas por pernos de acero y bujes de bronce con una capacidad de carga másica útil del orden de los 100 Kg.

El accionamiento es producido con un motor asíncrono con 3HP de potencia útil en el eje de salida el que conduce un mecanismo de excéntricas a través de un grupo de poleas y correas que permiten seleccionar velocidades de rotación del último árbol conducido. De este modo la frecuencia de excitación del ensayo puede ser variada desde 3 a 100 Hz mediante un controlador de velocidad del motor de accionamiento. Las amplitudes de desplazamiento de la excitación puede ser regulada entre 0 y 1mm gracias a un mecanismo de excéntricas.

El último árbol giratorio se vincula rígidamente a la placa móvil mediante un mecanismo de biela - manivela cuya relación longitud de biela versus radio de manivela es lo suficientemente elevada como para permitir considerar a los desplazamientos de la placa como sinusoidales. En la peor situación, esto es cuando $L/R=200/1$, los errores entre el desplazamiento real y el sinusoidal ideal no llegan al 1%.

El desplazamiento de la placa móvil es detectado por un sensor de velocidad del tipo de bobina móvil con imanes permanentes de tierras raras (Samarium-Cobalto) diseñado y construido por el grupo de investigación que ejecutó el proyecto.

Todas las partes móviles, organizadas según la manera descripta, se montaron en un bastidor construido con perfiles normales de acero unidos por cordones de soldadura conformando una estructura suficientemente rígida, vinculándolo a la fundación vía brocas de anclaje de tipo comercial en solo 3 puntos convenientemente seleccionados para evitar deformaciones elásticas que puedan dificultar el deslizamiento de las guías u ocasionar desgastes prematuros.

Las señales de salida de los distintos grados de libertad son obtenidos mediante sensores acelerométricos de estado sólido y transferidos a un ordenador personal mediante una interfase analógica / digital.

FINANCIAMIENTO

En términos generales el proyecto fue financiado de la manera siguiente.

- Un aporte de \$3000.- del CONICOR - Agencia Córdoba Ciencia monto que fue utilizado para:
 - Adquirir un ordenador personal.
 - Adquirir el motor de accionamiento.
 - Adquirir el drive variador de velocidad.
 - Adquirir componentes y materiales para uso mecánico y electrónico.
 - Pagar cursos pertinentes realizados por el Ingeniero Mario Nieto en la Universidad Autónoma de México.
- La Universidad Tecnológica Nacional – Facultad Regional Córdoba realizó el aporte de los salarios de los integrantes del grupo de investigación y la construcción de piezas especiales en el taller de mecanizado de su Centro Universitario de Desarrollos en Automación y Robótica utilizando básicamente su centro de mecanizado por control numérico.
- El Instituto Universitario Aeronáutico mediante la construcción de piezas mecánicas de precisión y el armado de subconjuntos y conjunto.
- Empresas del área metalmecánica del medio mediante la colaboración gratuita en el distensionado de la estructura soldada del bastidor y la ejecución de mecanizados especiales.

OBJETIVOS

Generales:

- Diseño, cálculo y construcción de un banco de pruebas que pueda excitar un modelo de estructura a través de la fundación con el objeto de analizar su comportamiento dinámico ante perturbaciones de tipo sísmicas.

Específicos

- Aportar solidez en los conocimientos teóricos y tecnológicos en diversas áreas, habida cuenta de su carácter multidisciplinario.
- Analizar teóricamente estructuras de "n" grados de libertad.
- Realizar la modelización dinámica de estructuras de "n" grados de libertad.
- Calcular y analizar los parámetros de la modelización física.
- Utilizar las técnicas de obtención de las respuestas mediante sensores inerciales.
- Adquirir y procesar los datos obtenidos de las señales.
- Utilizar la estación de ensayos en diversas cátedras de los distintos departamentos como:
 - Ingeniería Civil
 - Ingeniería Mecánica
 - Ingeniería Electrónica

MARCO TEÓRICO

Durante la fase de desarrollo conceptual se definió el dispositivo acorde con las necesidades y el estado del arte de este tipo de sistemas recurriendo a la búsqueda de antecedentes en la bibliografía y en Internet.

En la fase anteriormente mencionada como, así también en la de diseño, se recurrió al estudio analítico de cada caso particular poniendo énfasis en el

estudio de estructuras de múltiples grados de libertad solicitadas sísmicamente desde la fundación.

Para los cálculos aproximados de las frecuencias de resonancia, asumiendo amortiguamientos nulos, se utilizaron las Ecuaciones de Frecuencias recurriendo a los coeficientes de influencia, al Teorema de Reciprocidad de Maxwell y al Método de Newton. En lo atinente al cálculo de las rigideces estructurales de sistemas de "n" grados de libertad se utilizaron las formulaciones de Wilbur.

La solución completa y exacta de las amplitudes de oscilación de los distintos niveles, teniendo en cuenta los coeficientes de amortiguamiento de los mismos, fue obtenida mediante un método desarrollado por el grupo de investigación utilizando una herramienta matemática de resolución de la Transformada de Laplace. La verificación del método fue realizada mediante simulación numérica a través de Simulink de MATLAB.

El proyecto, con características multidisciplinarias, fue realizado por el equipo de investigadores intercambiando ideas y opiniones adoptando soluciones consensuadas y divulgando los hallazgos y logros significativos. Al respecto el proyecto fue expuesto en las Jornadas de Divulgación Tecnológica realizadas en el rectorado de la Universidad Tecnológica Nacional en noviembre de 1999.

DESARROLLO DE LAS HERRAMIENTAS DE CALCULO

Función De Transferencia De Un Sistema De 1 Grado De Libertad

En el cálculo numérico se ha utilizado el método de la transformada de Laplace para resolver las ecuaciones diferenciales de movimiento.

La ecuación de movimiento de un sistema excitado por una fuerza arbitraria es:

$$m \ddot{x} + c \dot{x} + k x = F(t)$$

Aplicando su transformada de Laplace, obtenemos:

$$m [s^2 \bar{x}(s) - x(o) - \dot{x}(o)] + c [s \bar{x}(s) - x(o)] + k \bar{x}(s) = \bar{F}(t)$$

Resolviendo $\bar{x}(s)$, obtenemos:

$$\bar{x}(s) = \frac{\bar{F}(s)}{ms^2 + cs + k} + \frac{(ms + c)x(o) + m\dot{x}(o)}{ms^2 + cs + k}$$

$$\bar{x}(s) = \frac{A(s)}{B(s)}$$

En donde $A(s)$ y $B(s)$ son polinomios y $B(s)$ en general es de mayor orden que $A(s)$

PARÁMETROS DEL MODELO MATEMÁTICO

Identificación De Los Parámetros Físicos

- Masas: Los elementos estructurales a tener en consideración como masas son:
 - Cargas vivas en losas.
 - Sobrecargas proporcionales en losas.
 - Cargas vivas en vigas.
 - Cargas vivas en columnas.

- Rigideces: Los elementos estructurales que generan fuerzas restitutivas de las acciones inerciales son:
 - Losas (diafragmas rígidos e indeformables).
 - Vigas.
 - Columnas.

Para el cálculo de rigideces de entrepisos se empleó la formulación de Wilbur

$$K_n = \frac{48E}{h_n \left[\frac{4h_n}{\sum R_{cn}} + \frac{h_{n-1} + h_n}{\sum R_{v(n-1)}} + \frac{h_n + h_{n+1}}{\sum R_{vn}} \right]}$$

K_n : Rigidez de entrepiso n.

R_c : Rigidez geométrica de columna = I_c/h_n

R_v : Rigidez geométrica de viga = I_v/h_v

h_n : Altura de columna.

l_v : Longitud de viga.

I_c : Momento de inercia de columna.

I_v : Momento de inercia de viga.

E : Módulo de elasticidad del material.

- Amortiguadores: Los elementos estructurales que generan fuerzas disipativas de las acciones inerciales son:
 - Vigas
 - Columnas

Para la estimación del amortiguamiento estructural se adoptó el criterio particular en el cálculo de estructuras civiles

Identificación De Los Parámetros Del Modelo A Escala

Leyes de similitud: asumiendo los mismos materiales para la estructura y su modelo, y una escala de longitudes "e" se demuestra que:

$$m = \frac{M}{e^3} \begin{cases} M : \text{masa real} \\ m : \text{masa del modelo} \end{cases} \quad c = \frac{C}{e^2} \begin{cases} C : \text{amortiguamiento real} \\ c : \text{amortiguamiento del modelo} \end{cases} \quad k = \frac{K}{e} \begin{cases} K : \text{rigidez real} \\ k : \text{rigidez del modelo} \end{cases}$$

Considerando que las leyes de similitud son establecidas solo para aquellos casos en que se utilice en el modelo el mismo material que la estructura original y asumiendo una estructura como una viga cantilever de sección constante y masa uniformemente distribuida, el cálculo de la frecuencia resulta:

$$F = \frac{k_n}{2\pi} \sqrt{\frac{E I g}{W L^4}}$$

W : peso por unidad de longitud. W/g : masa por unidad de longitud.

$$F = \frac{k_n \sqrt{E}}{2\pi} \sqrt{\frac{I}{\mu L L^3}} = \Psi \sqrt{\frac{I}{M L^3}}$$

Haciendo:

$$f = \Psi \sqrt{\frac{\frac{I}{e^4}}{\frac{M}{e^3} \frac{L^3}{e^3}}} = e \cdot \Psi \sqrt{\frac{I}{M L^3}}$$

$$\Psi = \frac{k_n \sqrt{E}}{2\pi} = \text{cte} \quad \text{y} \quad \mu L = m \quad (\text{masa total}) \quad \therefore f = \Psi \sqrt{\frac{I}{m L^3}}$$

Comparando las frecuencia original con la del modelo

$$f = \Psi \sqrt{\frac{i}{m \ell^3}} \qquad F = \Psi \sqrt{\frac{I}{M L^3}}$$

$f = e F$ La frecuencia del modelo es "e" veces la del original

Puede así determinarse que solicitando el modelo con una frecuencia $e F$ y una amplitud A/e se produce en el mismo sollicitaciones mecánicas idénticas a las de la estructura real, cuando ésta es sometida a una excitación de frecuencia F y amplitud A .

Definición De Masas Y Volúmenes Del Modelo

Se ha utilizado el Reglamento Argentino I.N.P.R.E.S. - C.I.R.S.O.C. 101 y 102 para la determinación de los parámetros físicos y mecánicos de los elementos resistentes de las estructuras de obras civiles.

BANCO DE ENSAYOS Y MODELO FÍSICO

Definición Conceptual Del Banco De Ensayos

Este proyecto contempló el desarrollo de una estación de ensayos dinámicos aplicable a estructuras de cualquier tipo, cuyas características conceptuales se detallan a continuación:

- Plataforma móvil: con un único grado de libertad consiste en una placa de aleación de aluminio mecanizado cuya cara superior dispondrá la interfase mecánica requerida para la fijación de la estructura a ensayar.
- Guías axiales: constituidas por pernos de acero y bujes de bronce.
- Accionamiento: motor asíncrono trifásico.
- Control de velocidad: driver para corriente alterna trifásica con tecnología IGBT.
- Conducción: mediante mecanismo biela manivela.
- Control de amplitudes: manual mecánico mediante posicionamientos relativos discretos de elementos excéntricos.
- Transmisión de potencia: mecánica entre árbol motriz y árbol excéntrico del tipo polea-correa.
- Volante de inercia: para el almacenamiento de energía cinética.

- Soporte de árbol excéntrico: mediante rodamiento a rodillos cónicos.
- Bastidor: construido mediante perfiles normales comerciales vinculados por soldadura.
- Soporte motor: con guía de desplazamiento y mecanismo tornillo-tuerca para tensión de correa.
- Medición de desplazamientos: se realizará con sensores acelerométricos de tercera generación.
- Adquisición de datos: la información de salida de los sensores será almacenada en una computadora digital a través de una placa conversora "A/D".
- El barrido de frecuencia se ejecutará mediante programas de ensayo desde una computadora personal, la cual controlará la velocidad de rotación del motor de accionamiento a través del conversor.
- Los datos obtenidos serán procesados relacionando salidas con entrada de manera de reconstruir experimentalmente la respuesta en amplitud con barrido de frecuencias de los distintos grados de libertad de cada espécimen con el objeto de analizar la consistencia con los cálculos teóricos efectuados.

Diseño Y Cálculo Del Banco De Ensayos

Para el diseño de los elementos constitutivos de la mesa de ensayos se plantearon dos soluciones a escala de una estructura real de probable construcción, fijando como dimensiones máximas aquellas que se ajusten a una de tipología estructural simple - Estructura aperturada de 10,00 metros de longitud en ambas direcciones con tres niveles en altura.

Al analizar los resultados del cálculo, efectuado a través de la metodología propuesta (Transformada de Laplace), los desplazamientos, velocidades, aceleraciones, fuerzas generadas y potencia necesaria para una escala 1:20, se llegó a la conclusión que la escala adoptada generaba valores que difícilmente pudieran corroborarse mediante ensayos físicos.

Se modifica la escala anterior a una relación 1:10 sobre la real. Las dimensiones en planta de la estructura deben ser reducidas a la mitad (5,00 m en cada dirección) ya que de esa forma se puede lograr el diseño de la placa soporte dentro de valores posibles de construir con el escaso financiamiento que se cuenta.

Definición De Las Características Dinámicas Del Modelo

Metodología utilizada

La solución completa y exacta de las amplitudes de oscilación de los distintos niveles de estructuras de múltiples grados de libertad, teniendo en cuenta los coeficientes de amortiguamiento de los mismos, se obtiene mediante el método desarrollado utilizando como herramienta matemática la Transformada de Laplace aplicada al modelo matemático del sistema.

Se debe tener en cuenta que, para que esta transformada sea aplicable, el sistema debe cumplir con los siguientes requisitos:

- Las variables y sus derivadas e integrales de los diversos órdenes deben estar elevados a la primera potencia.
- Los términos no deben presentar operaciones entre variables.

- Los coeficientes de las variables no dependen del tiempo ni de las variables.

En un sistema de 1 grado de libertad, si se desea conocer la respuesta referida a la excitación es conveniente tratar directamente la función transferencia X_1/X_0 , siendo X_1 y X_0 las transformadas de los desplazamientos del primer nivel y de la fundación respectivamente, resultando:

$$\frac{X_1}{X_0} = \frac{cs + k}{ms^2 + cs + k}$$

Por una propiedad de la transformada el reemplazo de s por $j\omega$ en la igualdad anterior muestra, en forma de número complejo, a la ley de variación de \bar{x}_1/\bar{x}_0 en función de la frecuencia de excitación " ω ", siendo \bar{x}_1 y \bar{x}_0 las amplitudes de los desplazamientos en el nivel 1 y en la fundación respectivamente, quedando:

$$\frac{\bar{x}_1}{\bar{x}_0} = \frac{cj\omega + k}{-m\omega^2 + cj\omega + k}$$

Ordenando y racionalizando se llega a una expresión del tipo:

$$\frac{\bar{x}_1}{\bar{x}_0} = a + jb$$

Como en rigor interesa la relación de amplitudes en términos absolutos conviene calcular los módulos, con lo que:

$$\left| \frac{\bar{x}_1}{\bar{x}_0} \right| = \sqrt{a^2 + b^2}$$

Con el objeto de sistematizar la metodología se adopta un sistema de 3 grados de libertad. Al igual que para el caso de 1 grado de libertad, la estructura es solicitada desde la fundación con un movimiento sinusoidal simulando una acción del tipo sísmica de dirección horizontal. Si bien se utiliza un modelo físico matemático de desplazamiento vertical se debe tener en cuenta que para el caso de estructuras civiles los desplazamientos dominantes son los del tipo horizontal.

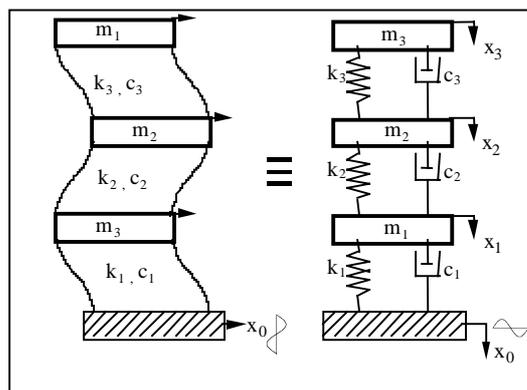


Figura 1

La figura 1 muestra la similitud entre la estructura real y el modelo físico-matemático equivalente.

Para evitar confusiones con los signos de las fuerzas que se originan en cada uno de los componentes, especialmente en resortes y amortiguadores, conviene bloquear todos los niveles liberando de a uno el nivel en estudio y los adyacentes para conformar la ecuación diferencial que modeliza la dinámica de ese nivel.

Nivel	Liberación del nivel i	Liberación del nivel i+1	Liberación del nivel i-1
1	$m_1\ddot{x}_1+c_1(\dot{x}_0-\dot{x}_1)+k_1(x_0-x_1)$	$-c\dot{x}_2-kx_2$	$-c\dot{x}_0-kx_0=0$
2	$m_2\ddot{x}_2+c_2(\dot{x}_1-\dot{x}_2)+k_2(x_1-x_2)$	$-c\dot{x}_3-kx_3$	$-c\dot{x}_1-kx_1=0$
3	$m_3\ddot{x}_3+c_3(\dot{x}_2-\dot{x}_3)+k_3(x_2-x_3)$	0	$-c\dot{x}_2-kx_2=0$

Conformando el siguiente sistema de ecuaciones

$$\begin{cases} m_1\ddot{x}_1+(c_1+c_2)\dot{x}_1+(k_1+k_2)x_1-c_2\dot{x}_2-k_2x_2=c_1\dot{x}_0+k_1x_0 \\ m_2\ddot{x}_2+(c_2+c_3)\dot{x}_2+(k_2+k_3)x_2-c_2\dot{x}_1-k_2x_1-c_3\dot{x}_3-k_3x_3=0 \\ m_3\ddot{x}_3+c_3\dot{x}_3+k_3x_3-c_3\dot{x}_2-k_3x_2=0 \end{cases}$$

Ordenando en función de las variables, teniendo en cuenta que X_0 es la transformada de la amplitud de la sollicitación desde la fundación, y aplicando a la vez la transformada de Laplace resulta en forma matricial:

$$\begin{bmatrix} m_1s^2+(c_1+c_2)s+(k_1+k_2) & -(c_2s+k_2) & 0 \\ -(c_2s+k_2) & m_2s^2+(c_2+c_3)s+(k_2+k_3) & -(c_3s+k_3) \\ 0 & -(c_3s+k_3) & m_3s^2+c_3s+k_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_1 \\ X_2 \\ X_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (c_1s+k_1)X_0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

Determinando un sistema de 3 ecuaciones diferenciales simultáneas con 3 incógnitas que son las transformadas de los desplazamientos absolutos de cada uno de los niveles.

Es conveniente notar que los desplazamientos x_i obtenidos serán valores complejos y referidos a un sistema absoluto de coordenadas. Para conocer los desplazamientos relativos será necesario operar por diferencias entre los

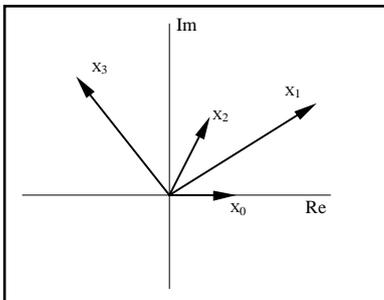


Figura 2

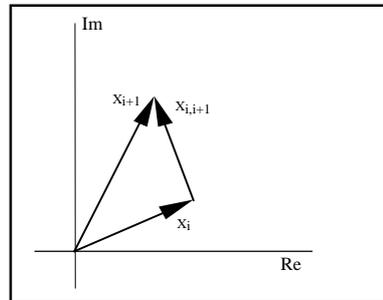


Figura 3

desplazamientos x_i de los distintos niveles. La figura 2 muestra un diagrama vectorial a modo de ejemplo; como x_0 es la excitación y tiene una amplitud conocida se toma como referencia y se asume como un valor real.

El cálculo del desplazamiento relativo - figura 3 - entre niveles es muy importante desde el punto de vista de las sollicitaciones estructurales ya que permite obtener, por ejemplo, los momentos flectores y los esfuerzos de corte.

Resolución del sistema de ecuaciones – ejemplo

Determinar la respuesta en el dominio de la frecuencia de una estructura de hormigón reforzado de 5 m de longitud en cada dirección y 3 m de altura entre cada nivel, losas macizas de 12 cm de espesor, vigas perimetrales de 20 cm de ancho por 50 cm de altura y 4 columnas de 20 cm por 20 cm de lado, excitado por un movimiento sinusoidal en la fundación de 5 mm de amplitud.

La masa de cada nivel se determinó siguiendo los lineamientos del reglamento INPRES – CIRSOC para las construcciones sismorresistentes. La rigidez de

entrepiso se calculó aplicando el método de Wilbur. Para calcular la constante de amortiguamiento "c" se adoptó como relación de amortiguamiento el 5% del amortiguamiento crítico, valor empleado para estructuras de hormigón reforzado con armadura, mediante la relación $c = \zeta * 2\sqrt{km}$.

Caso "a": Algoritmo de cálculo para la resolución de un sistema de ecuaciones de equilibrio de fuerzas en un sistema de tres masas concentradas, resueltas por el método de la "Transformada de Laplace" - dominio de las frecuencias.

Se determinan para cada nivel:

- Desplazamientos absolutos
- Desplazamientos relativos
- Velocidades absolutas
- Velocidades relativas
- Aceleraciones absolutas
- Aceleraciones relativos
- Fuerzas generadas
- Potencia necesaria en la planta motriz

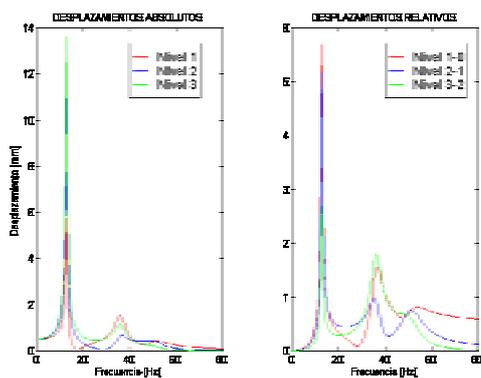


Gráfico 01 Solución gráfica del modelo matemático de tres grados - Desplazamiento

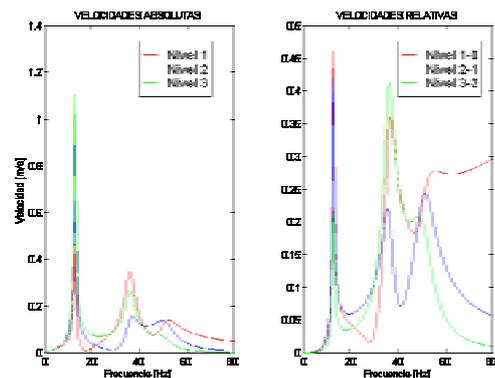


Gráfico 02 Solución gráfica del modelo matemático de tres grados - Velocidad

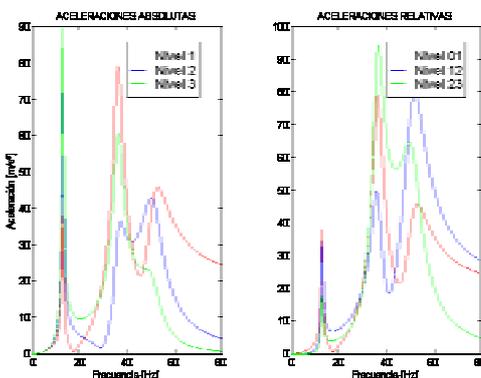


Gráfico 03 Solución gráfica del modelo matemático de tres grados - Aceleraciones

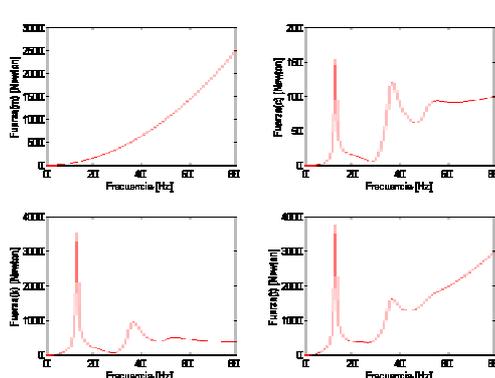


Gráfico 04 Solución gráfica del modelo matemático de tres grados - Fuerzas generadas

Caso "b": Algoritmo de cálculo para la resolución de un sistema de ecuaciones de equilibrio de fuerzas en un sistema de tres masas concentradas, resueltas por el

método de la "Transformada de Laplace" - dominio de las frecuencias para el caso donde el factor de amortiguamiento es variable -.

Se determinan para cada nivel:

- Desplazamientos absolutos.

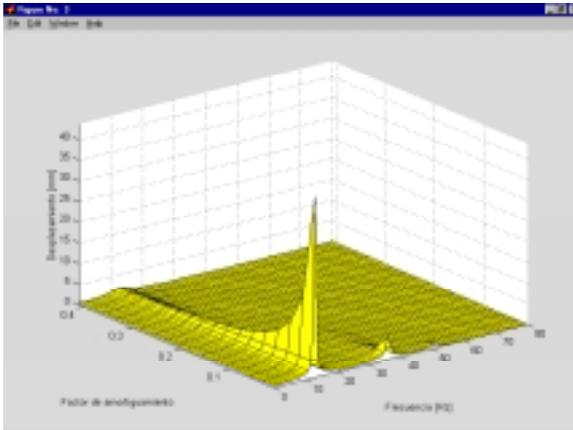


Gráfico 05 Solución gráfica del modelo matemático de tres grados de libertad. Factor de amortiguamiento variable 3° Nivel

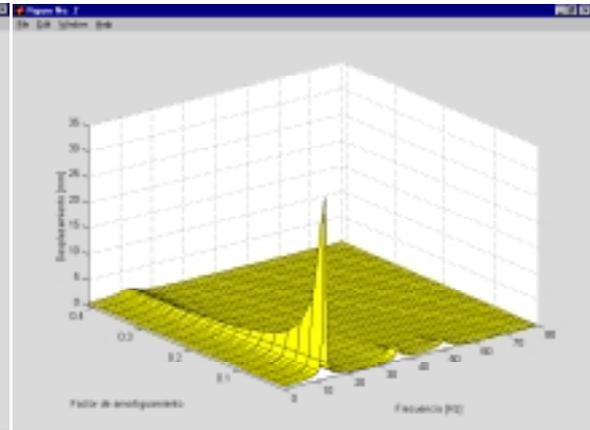


Gráfico 06 Solución gráfica del modelo matemático de tres grados de libertad. Factor de amortiguamiento variable 2° Nivel

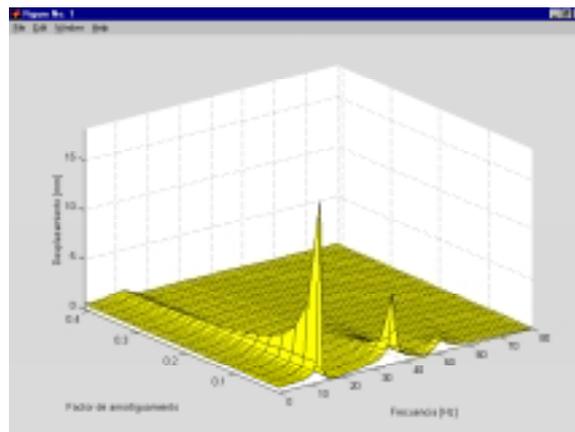


Gráfico 07 Solución gráfica del modelo matemático de tres grados de libertad. Factor de amortiguamiento variable 1° Nivel

Simulación Numérica En Simulink

El diagrama de bloques representa al modelo matemático del siguiente sistema de ecuaciones:

$$m_1 \ddot{x}_1 + (c_1 + c_2) \dot{x}_1 + (k_1 + k_2)x_1 - c_2 \dot{x}_2 - k_2 x_2 = c_2 \dot{x}_0 + k_2 x_0$$

$$m_2 \ddot{x}_2 + (c_2 + c_3) \dot{x}_2 + (k_2 + k_3)x_2 - c_2 \dot{x}_1 - k_2 x_1 - c_3 \dot{x}_3 - k_3 x_3 = 0$$

$$m_3 \ddot{x}_3 + c_3 \dot{x}_3 + k_3 x_3 - c_3 \dot{x}_2 - k_3 x_2 = 0$$

El gráfico 08 representa la respuesta en el tiempo al modelo antes planteado con una excitación dinámica en la fundación a través de una fuerza periódica de tipo senoidal. El gráfico 09 muestra zona ampliada a modo de detalle.

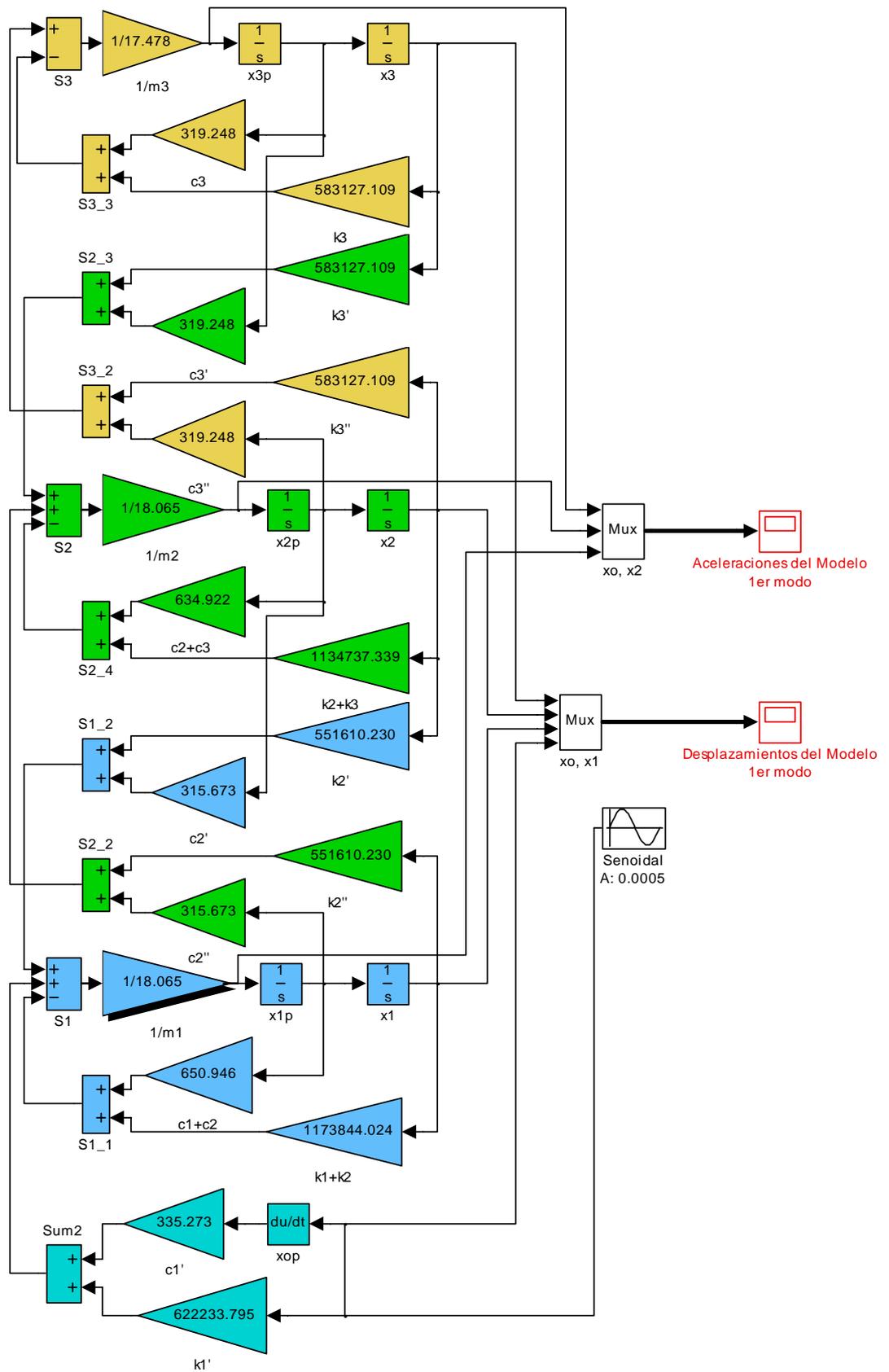


Diagrama analógico de simulación

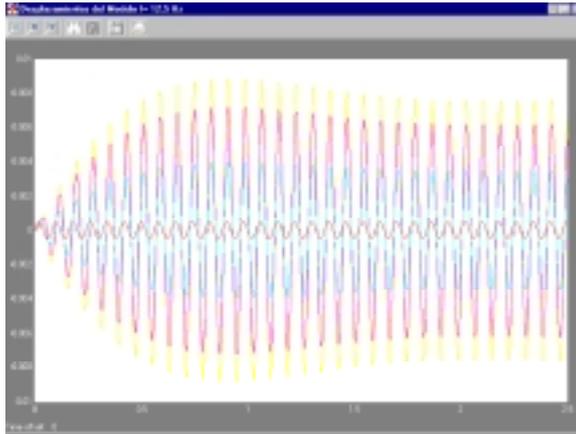


Gráfico 08. Salida gráfica del modelo matemático de tres grados de libertad

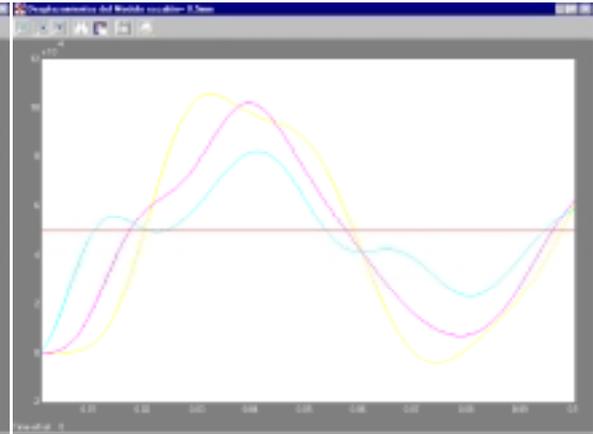
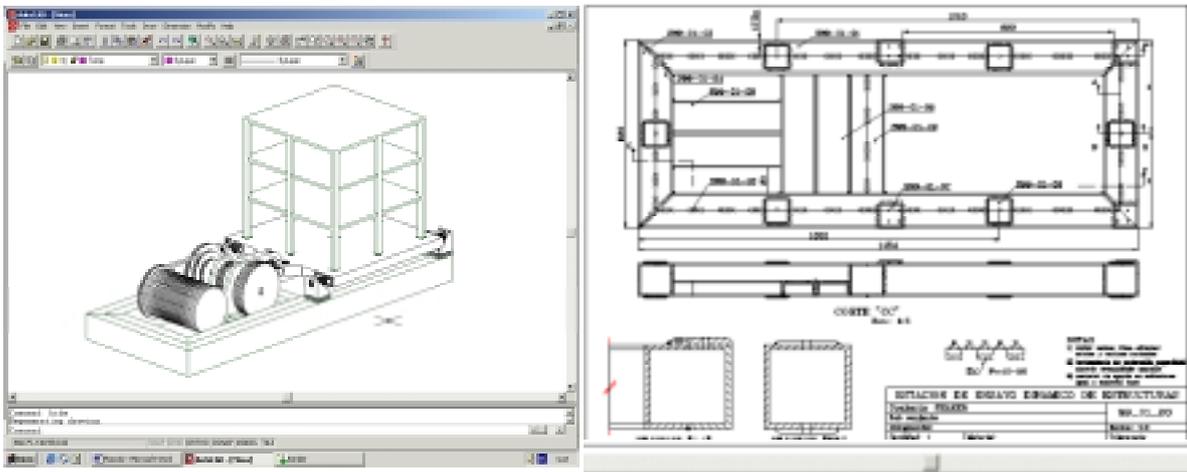


Gráfico 09 Salida gráfica del modelo matemático de tres grados de libertad

Definición De Las Características Geométricas y Mecánicas Del Banco De Ensayos



El Gráfico 10. Plano general y de bastidor

El Gráfico 10 presenta dos planos representativos de un total de 40 que definen los componentes de la estación de ensayos.

Adquisición De Componentes Y Materiales

Citamos a continuación las adquisiciones mas relevantes:

- Un motor asincrónico trifásico con 3 HP de salida.
- Un driver con tecnología "IGBT".
- Perfiles normales de acero para la construcción del bastidor.
- Una placa de aleación de aluminio para la construcción de la plataforma móvil y la biela de conducción.
- Cuatro rodamientos de rodillos cónicos para soporte de árbol de excéntricos.
- Dos acelerómetros "ADXL 250" de "Analog Devices".
- Dos acelerómetros "ADXL 202" de "Analog Devices".
- Procesador Pentium III – 700 MHz

TRABAJO DE CAMPO

Las tareas ejecutadas se describen a continuación y fueron agrupadas en actividades que se realizaron acorde al cronograma mostrado en la presentación de la propuesta de ejecución del proyecto.

- Recopilación bibliográfica y documental
- Análisis bibliográfico
- Generación de requerimientos
- Análisis de amplitudes en el dominio de la frecuencia de sistemas de "n" grados de libertad sin amortiguamiento
- Modelización matemática de sistemas de "n" grados de libertad con amortiguamiento utilizando la Transformada de Laplace
- Resolución analítica de sistemas de "n" grados de libertad con amortiguamiento
- Resolución mediante simulación numérica de sistemas de "n" grados de libertad con amortiguamiento
- Identificación de los parámetros físicos en estructuras civiles: masas, rigideces y amortiguamientos
- Estudio de las leyes de similitud para el análisis de modelos de estructuras a escala
- Realización de cursos de perfeccionamiento por parte del Ing. Mario Nieto en la Universidad Autónoma de México
- Definición conceptual del banco de ensayos
- Diseño, cálculo y dimensionamiento de partes mecánicas
- Diseño del sensor de velocidad de la placa móvil
- Presentación del proyecto en las Jornadas de Divulgación Científica y Tecnológica realizadas en el Rectorado de la Universidad Tecnológica Nacional
- Adquisición de sensores acelerométricos
- Ensayos estáticos y dinámicos de los acelerómetros
- Cálculo de la potencia necesaria y selección del motor de accionamiento
- Selección y adquisición del driver controlador de la velocidad de rotación
- Adquisición de componentes y materiales
- Construcción de partes mecánicas
- Tratamiento térmico de distensionado de la estructura del bastidor
- Tratamientos de protección superficial de piezas de acero y de aleación de aluminio
- Construcción del sensor de velocidad de la placa móvil
- Integración de subconjuntos y conjunto mecánico
- Puesta a punto del sistema de adquisición de datos
- Diseño y construcción de las interfaces de los acelerómetros
- Diseño, cálculo y construcción de un modelo de estructura civil con 3 grados de libertad en escala 1 en 10
- Ensayos de subconjuntos y conjunto
- Evaluación
- Confección de la documentación

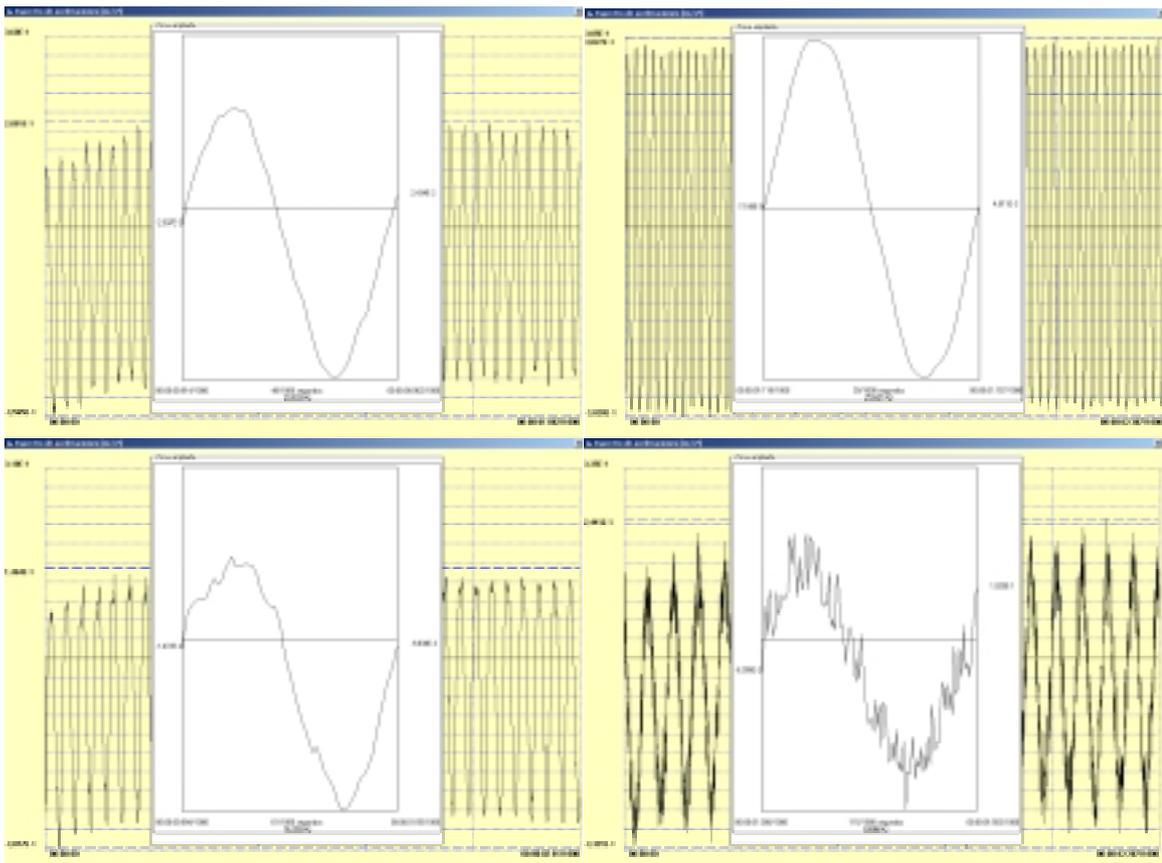
TRANSFERENCIA

El dispositivo fue transferido al Departamento de Ingeniería Civil de la Facultad Regional Córdoba de la Universidad Tecnológica Nacional habiendo sido el mismo instalado en el aula n° 025 de la planta baja de la mencionada unidad académica. Alumnos de la Cátedra de Dinámica Estructural han realizado sus prácticas y cotejado con los resultados en forma analítica y por simulación numérica arribando a resultados altamente satisfactorios.

INTERPRETACIÓN DE LOS DATOS

Los siguientes registros muestran las salidas de los sensores de aceleración en los distintos niveles cuando se excitó al modelo de una estructura de tres niveles descrita anteriormente. Este ensayo fue realizado por los estudiantes de la Cátedra de Dinámica Estructural con amplitudes de excitación constante de 0,1 mm y frecuencias de: 25, 20, 15, 8 Hz.

Los registros de los mencionados ensayos muestran el grado de deterioro de la señal obtenida con la disminución de la frecuencia. Esto se debe a que al crecer la frecuencia mejora la relación entre el nivel de la señal y el nivel de ruidos propios del sensor y su electrónica asociada. Esta relación se ve intensificada por el hecho que la aceleración crece con el cuadrado de la frecuencia de la excitación.

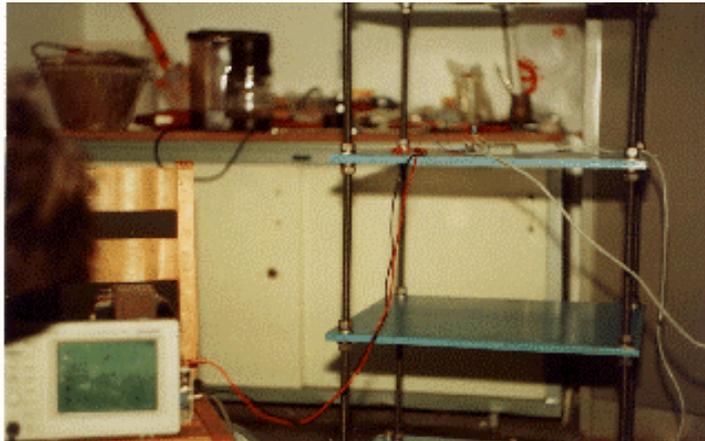


IMAGENES DEL PROYECTO

En las fotografías 01 a 03 se muestra la estación de ensayos instalada en el laboratorio, con un modelo estructural de 3 grados de libertad escala 1:10 de la estructura tomada como referencia. En las 01 y 02 se observa el sistema de lectura de señales.



Fotografía 01

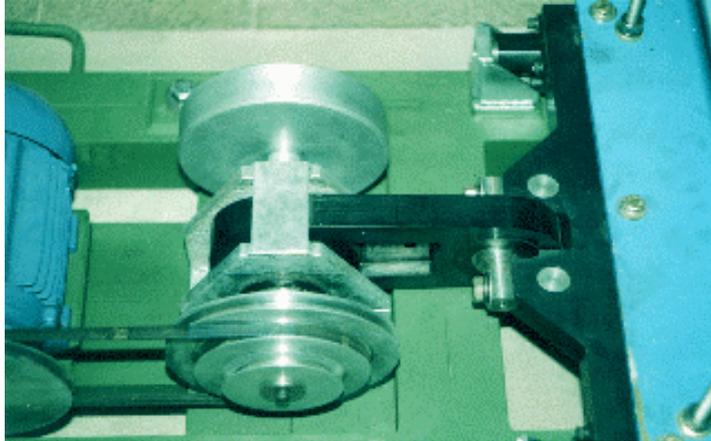


Fotografía 02

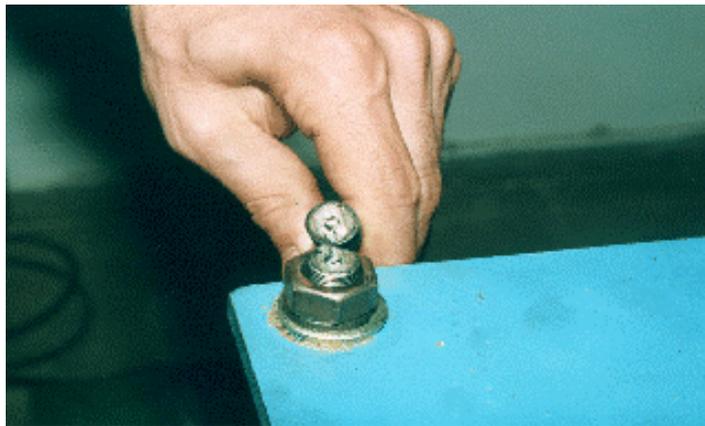


Fotografía 03

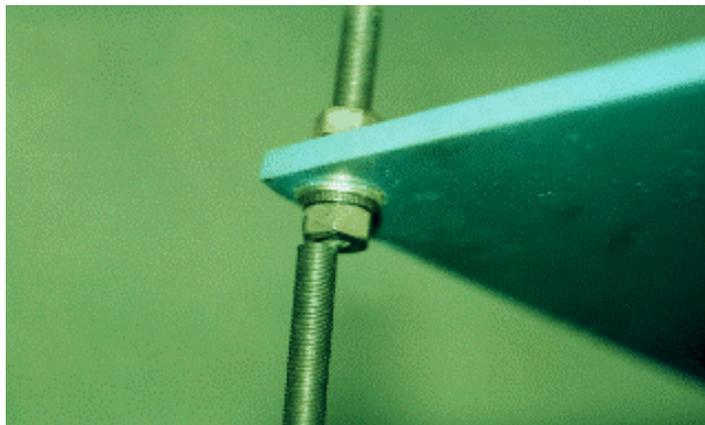
En la fotografía 04 se muestra el mecanismo biela-manivela. En las fotografía 05 y 06 se puede observar una barra del modelo que se ensayo hasta la rotura de la misma.



Fotografía 04



Fotografía 05



Fotografía 06

CONCLUSIÓN

Se ha logrado satisfacer el objetivo fundamental del proyecto que es el logro de un banco de ensayos dinámicos diseñado, calculado y construido por un grupo multidisciplinario de investigadores de la Universidad Tecnológica Nacional Facultad Regional Córdoba, del Instituto Universitario Aeronáutico y de la UNC.

Durante la marcha del proyecto se ha idealizado en profundidad en la teoría de la Dinámica de los Sistemas con grados de libertad múltiples modelizados con parámetros concentrados pero, en contraste con los desarrollos encontrados en la bibliografía consultada, se ha tenido en cuenta el amortiguamiento estructural. Como resultado de este análisis se ha logrado desarrollar un método de cálculo que, utilizando la Transformada de Laplace y Matlab como herramientas, permite evaluar la respuesta de los "n" grados de libertad de una estructura cuando se la solicita con cargas alternativas sinusoidales por la fundación o por alguno de sus niveles.

En lo atinente a la utilización de modelos a escala la investigación permitió definir las leyes de similitud entre los parámetros característicos de las estructuras reales y las simuladas.

El proceso de ejecución del proyecto ha sido de gran utilidad en la formación de recursos humanos ya que ha enriquecido los conocimientos de los investigadores docentes que utilizan estos conceptos en forma permanente. En lo que respecta a la formación de grado los resultados han sido muy buenos ya que se ha podido observar el interés puesto por los alumnos en la realización de los trabajos prácticos y la contribución a los aprendizajes significativos cuando cotejan los resultados teóricos con los obtenidos en los ensayos.

Finalmente se considera que el grupo de investigadores ha adquirido durante la concreción del proyecto experiencia suficiente como para abordar uno de mayor envergadura como podría ser el desarrollo de un sistema de múltiples grados de libertad con una capacidad de carga útil más acorde con los laboratorios modernos dedicados a estudios sismológicos.

BIBLIOGRAFÍA

- CLOUGH, Ray W. – PENZIEN Joseph; "Dynamics of Structures"; Editorial: Mc Graw Hill; ISBN0-07-011394-7; Año 1993.
- THOMSOM, William - RINCON CASTELZILL, Humberto; "Teoría de Vibraciones" – Editorial: Prentice-Hall Hispanoamericana ISBN 968-880-099-6; Año 1992.
- DEN HARTOG, J.P.; "Mecánica de las Vibraciones" – Editorial: CECSA; Año 1987.
- ZILL, Dennis; "Ecuaciones diferenciales con aplicaciones de modelado" – Editorial: Thomson ISBN 968-7529-21-0; Año 1999.
- BOZZO, Luis y BARBAT, Alex; "Diseño sismorresistente de edificios – Técnicas convencionales avanzadas" – Editorial: Reverté; Año 1999.
- COLINDRES, Rafael; "Dinámica de suelos y estructuras"; Editorial: Limusa ISBN 968-18-4721-0; Año 1993.
- CANET y BARBAT; "Estructuras sometidas a acciones sísmicas"; Editorial: Barcelona; Año 1988.
- CREDE; "Conceptos sobre choque y vibración en el uso de Ingeniería".

- BAZÁN, Enrique y MELI, Roberto;" Diseño sísmico de edificios"; Editorial Limusa ISBN 968-18-5349-0; Año 1999.
- Memorias del "XXV CURSO INTERNACIONAL DE INGENIERIA SISMICA (MÉXICO 1999)".
- GARCIA REYES, Luis Enrique; "Dinámica estructural aplicada al diseño sísmico"; Editorial Universidad de los Andes – Facultad de Ingeniería – Bogotá Colombia ISBN ET; Año 1998.