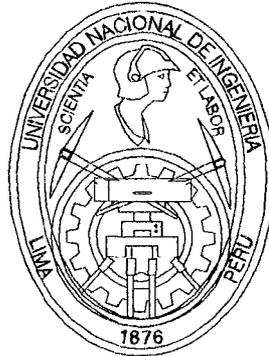


UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERIA
FACULTAD DE INGENIERIA CIVIL



**“DESARROLLO DE SOFTWARE PARA EL CONTROL DE
ACTUADORES EN LINEA EN ENSAYOS DE ESTRUCTURAS
A ESCALA NATURAL”.**

TESIS

PARA OPTAR EL TITULO PROFESIONAL DE:

INGENIERO CIVIL

CHUNGA CONTRERAS, CARLOS I.

AGOSTO 2001

Digitalizado por:

**Consortio Digital del
Conocimiento MebLatam,
Hemisferio y Dalse**

AGRADECIMIENTO

Esta tesis surge como parte de la idea y el interés del Dr. Carlos Zavala Toledo, Director del CISMID, por modernizar y automatizar los equipos que posee el Laboratorio de Estructuras del CISMID para realizar ensayos en estructuras a escala natural. Para realizar los programas de adquisición de datos fue necesario adquirir una tarjeta de adquisición de datos y un software de programación visual LABVIEW 4.1 que fue adquirido con los recursos que posee el CISMID.

Mi agradecimiento de manera sumamente especial para el Dr. Carlos Zavala Toledo por haberme dado la oportunidad y por su asesoramiento e interés durante todo el desarrollo de esta tesis.

También agradezco al Ing. Jorge Gallardo Tapia (Jefe del Laboratorio de Estructuras del CISMID) por el apoyo brindado, por sus oportunos consejos y haberme dado las facilidades para la utilización del equipo necesario.

Mi agradecimiento también va dirigido a mis amigos: Claudia Honma, Dina Cotrado, Patricia Gibu, Luis Lavado, Germán Valdivia, por brindarme su ayuda durante la ejecución de los ensayos. Mi agradecimiento también al Sr. Germán Bautista Milla por su colaboración como técnico del Laboratorio de Estructuras, al Sr. Larry Cárdenas y al Sr. Fabián por su ayuda en el montaje de los muros y finalmente a quien siempre estuvo a mi lado alentándome a cada momento, me refiero a Mónica.

A mis padres:

ALEJANDRINA Y EUGENIO.

Con todo cariño por apoyarme para
lograr una de mis mayores aspiraciones

A mis hermanos:

ALDO Y EDUARDO

A mi asesor:

Dr. Ing. Carlos Zavala Toledo

Por su invaluable ayuda y sus enseñanzas.

INDICE

CAPITULO I: INTRODUCCIÓN.

1.1	Resumen.....	1
1.2	Introducción.....	5

CAPITULO II: INTRODUCCIÓN AL USO DE LA PROGRAMACION VISUAL USANDO EL PROGRAMA LABVIEW 4.1.

2.1	Ventanas PANEL y DIAGRAM.....	7
2.2	Menús.....	8
2.3	Uso de los modos EDIT y RUN.....	9
2.4	Creación de Objetos.....	10
2.5	Herramientas de LABVIEW.....	12
2.6	Ayuda y Ventana de Ayuda.....	13
2.7	Ejemplos Ilustrativos	
2.7.1	Ejemplo de un control de entrada analógico (AI Sample Channel.).....	15
2.7.2	Ejemplo de un control de salida analógico (AO Update Channel.).....	16

CAPITULO III: APLICACIONES EXPERIMENTALES DE ENSAYOS DE CARGA LATERAL CÍCLICA Y PSEUDO DINÁMICO.

3.1	Aplicaciones en el Instituto de Ciencia Industrial, Universidad de Tokio.....	17
3.2	Aplicaciones por el Instituto de Investigación en la Construcción del Ministerio de Construcción.....	25
3.3	Aplicaciones en otras Instituciones de Investigación.....	31
3.4	Aplicaciones Por El Centro Peruano Japonés De Investigaciones Sísmicas Y Mitigación De Desastres.....	33

CAPITULO IV: FUNDAMENTO TEÓRICO.

4.1 Ecuación de Movimiento.....	35
a) Método de Integración Directa.....	36
b) Superposición de Modos.....	37
4.1.1 Ensayos Estáticos	
4.1.1.1 Prueba de carga lateral Monotónica.....	39
4.1.1.2 Prueba de carga lateral Cíclica.....	40
4.1.2 Ensayo Pseudo Dinámico.....	41
4.2 Historia del desarrollo del ensayo Pseudo Dinámico.....	47
4.3 Instrumentación y adquisición de datos	
4.3.1 Sistema de Carga.....	50
4.3.2 Sistema de Medición.....	52
4.3.3 Sistema de control.....	56

CAPITULO V: POSIBLES FUENTES DE ERRORES EN EL ENSAYO PSEUDO-DINÁMICO.

5.1 Fuentes de error.....	58
5.2 Características de los errores intrínsecos.....	59
5.3 Características de los errores experimentales.....	61

CAPITULO VI: ALGORITMO UTILIZADO EN ENSAYOS EN LÍNEA

6.1 Ensayo de Carga Lateral Cíclica.....	62
6.1.1 Diagrama de Flujo.....	65
6.1.2 Descripción.....	66
6.2 Ensayo Pseudo Dinámico.....	67
6.2.1 Diagrama de Flujo.....	71
6.2.2 Descripción.....	74
6.3 Algoritmos para el control exacto de la prueba.....	76
6.4 Control Digital	80

CAPITULO VII: INTERPRETACIÓN Y PROCESAMIENTO DE DATOS

7.1 Ensayo de Carga Lateral Cíclica.	
7.1.1 Metodología del Ensayo.....	81

7.1.2	Procesamiento de Datos.....	83
7.1.3	Interpretación de Resultados.....	86
7.2	Ensayo Pseudo Dinámico	
7.2.1	Metodología del Ensayo.....	93
7.2.2	Procesamiento de Datos.....	94
7.2.3	Interpretación de Resultados.....	95

CAPITULO VIII: COMENTARIOS Y CONCLUSIONES.

8.1	Papel de la Prueba On-line en el Estudio de la Ingeniería Sísmica.....	98
8.2	Nuevas Dimensiones de la Prueba On-Line.....	99
8.3	Conclusiones.....	98
8.4	Comparación del Programa Antiguo y Actual.....	102

ANEXOS

1. OTRAS APLICACIONES USANDO EL LAB VIEW
2. APLICACIÓN DE MICROCOMPUTADORAS DE CONTROL DIGITAL EN ESTRATEGIAS PARA LA REDUCCIÓN DE LA RESPUESTA
3. RESPUESTA INELÁSTICA DE SISTEMAS ESTRUCTURALES
4. MODELOS DE HISTÉRESIS DE LAS ESTRUCTURAS PARA EL ANÁLISIS DE RESPUESTA SÍSMICA.

BIBLIOGRAFÍA

CAPITULO I

RESUMEN

En la actualidad, existe un gran avance en el estudio del comportamiento de las estructuras; habiéndose realizado en todo el mundo muchos ensayos de componentes estructurales, miembros, síb estructuras y modelos a escala. La innovación de las computadoras ha permitido el desarrollo de las técnicas numéricas para el análisis de las estructuras; sin embargo, algunas simplificaciones y suposiciones son inevitables con el análisis numérico. Por otro lado, la información experimental se ve plasmada en los códigos de diseño mediante la interpretación de los resultados de los ensayos de componentes y miembros, permaneciendo el problema de cuan efectivamente han sido interpretados estos datos. Con el objeto de evaluar la validez de estas suposiciones e interpretaciones, y examinar finalmente el comportamiento general de las estructuras, es necesario llevar a cabo ensayos a escala natural o a escalas grandes.

El Laboratorio de Estructuras del Centro Peruano-Japonés de Investigaciones Sísmicas y Mitigación de Desastres (CISMID) de la Facultad de Ingeniería Civil de la Universidad Nacional de Ingeniería (FIC-UNI), está

especialmente diseñado para llevar a cabo ensayos de estructuras a escala natural y/o a escalas grandes.

En el CISMID y otras Instituciones se han realizado ensayos a escala natural en pórticos de hasta tres niveles y módulos de dos niveles. En forma más amplia se han efectuado ensayos de componentes y miembros estructurales, sobre todo para construcciones de adobe, madera y eventualmente albañilería de ladrillos de arcilla y bloques de concreto y concreto reforzado. En el Laboratorio del CISMID se están realizando ensayos con nuevos sistemas constructivos.

El Laboratorio de Estructuras del CISMID FIC-UNI cuenta para efectuar los ensayos a escala natural, con una losa de ensayos, el sistema de carga, el sistema de procesamientos de datos y el sistema de ensayo supervisado por medio de computadoras.

En el presente trabajo se describen:

CAPITULO II: INTRODUCCIÓN AL USO DE LA PROGRAMACIÓN VISUAL;

En este capítulo se discute los aspectos necesarios para familiarizarse con el uso del LABVIEW, incluyendo menús, ventanas Panel y Diagram, creación de objetos; herramientas y obtención de ayuda.

CAPITULO III: APLICACIONES EXPERIMENTALES DE ENSAYOS DE CARGA LATERAL CÍCLICA Y PSEUDO DINÁMICO;

En este capítulo hablaremos sobre las diversas aplicaciones de este tipo de ensayos realizadas

por otras Instituciones de Investigación y Universidades del Japón y la Universidad Nacional de Ingeniería (CISMID).

CAPITULO IV: FUNDAMENTO TEÓRICO; En este capítulo describiremos las soluciones experimentales para resolver la ecuación de movimiento, la instrumentación y adquisición de datos utilizados en los ensayos Estático y/o Pseudo Dinámico.

CAPITULO V: POSIBLES FUENTES DE ERROR EN EL ENSAYO PSEUDO-DINÁMICO; En este capítulo comentaremos las fuentes que pueden traer errores en las respuestas obtenidas del ensayo Pseudo Dinámico. Generalmente hablando, las fuentes del error son clasificadas en dos grupos: las fuentes del error intrínseco y las fuentes del error experimental.

CAPITULO VI: DIAGRAMA DE FLUJO; En este capítulo se explicará y se mostrará el algoritmo utilizado para el desarrollo del ensayo de Carga Lateral Cíclica y el ensayo Pseudo Dinámico. También comentaremos algunas consideraciones que hay que tomar para el control crítico.

CAPITULO VII: INTERPRETACIÓN Y PROCESAMIENTO DE DATOS; En este capítulo mostraremos como se procesan los datos de salida obtenidos del ensayo de Carga Lateral Cíclica y el ensayo Pseudo Dinámico, asimismo la interpretación de los diferentes gráficos obtenidos del procesamiento de los datos de salida.

ANEXOS: En el anexo (1) mostraremos otros paquetes que fueron desarrollados para la adquisición de datos para las distintas tarjetas y equipos que posee el Laboratorio de Estructuras del CISMID. En el anexo (2) comentaremos sobre la Aplicación de microcomputadoras de control digital en estrategias para la reducción de la respuesta estructural. En el anexo (3) presentaremos el comportamiento inelástico de sistemas estructurales. Finalmente, en el anexo (4) expondremos los diferentes modelos de histéresis de las estructuras para el análisis de respuesta sísmica.

INTRODUCCIÓN.

Para el estudio del comportamiento sísmico de las estructuras se tienen dos métodos generales: el experimental y el analítico. En el trabajo experimental se realizan ensayos de componentes, miembros estructurales, modelos a escala y sub estructuras, y los resultados de dichos ensayos son correlacionados para desarrollar modelos analíticos para posteriormente representar el comportamiento de una estructura real vía análisis. El método analítico parte de una formulación puramente matemática del fenómeno físico (con ciertas suposiciones y simplificaciones) y el problema es resuelto generalmente mediante un análisis numérico, utilizando computadoras digitales de gran capacidad.

Actualmente los ensayos de laboratorio se ven grandemente facilitados por la innovación tecnológica de los diversos dispositivos usados. El Laboratorio de Estructuras del CISMID cuenta con actuadores de aplicación de carga de gran capacidad y precisión; así como con instrumentos de medición muy refinados que hacen posible el monitoreo de desplazamientos, rotaciones y esfuerzos con una gran precisión en una estructura real ensayada. El progreso en los estudios analíticos también es de destacar, ya que el desarrollo de las computadoras ha permitido utilizar las técnicas iterativas de solución para resolver varios problemas no lineales. Asimismo, el método de los elementos finitos constituye una de las poderosas herramientas en las técnicas de análisis.

Los ensayos de componentes y miembros estructurales suministran información útil sobre las características de estos elementos, pero muy poco se

puede conocer del comportamiento de una estructura en el cual muchos elementos están combinados. En otras palabras, el efecto de las conexiones de los miembros que forman la estructura sobre el comportamiento integro de una estructura; sin embargo, cuando se selecciona la subestructura es necesario asignar artificialmente ciertas condiciones de borde que muchas veces son difíciles de simular perfectamente. La validez de las condiciones de borde adoptadas solo puede ser verificada mediante la comparación con el comportamiento real de la estructura. Los ensayos estructurales de modelos a escala reducida empleados con el objeto de evaluar el comportamiento total de una estructura tiene el problema de cómo los constituyentes individuales de la estructura deben ser escalados. Por ejemplo, en el caso de modelos estructurales de concreto reforzado, el tamaño del agregado y las barras de refuerzo no pueden ser escalados adecuadamente una vez que la relación de escala ha sido reducida a cierto nivel.

Todo lo mencionado anteriormente sugiere la necesidad de efectuar ensayos de estructuras a escala natural o por lo menos a escalas grandes. Sin embargo, esto no significa que siempre será necesario efectuar dichos ensayos ya que estos son muy costosos, sino que deben ser realizados cuando una confirmación final es requerida después de todo un programa de investigación.

(Ref 9)

En el presente estudio se presentan diversos desarrollos de software aplicados en ensayos a escala natural, así como aplicaciones que muestran su aplicabilidad. Para el desarrollo del software se hace uso de la programación visual, lo que seguidamente es descrito.

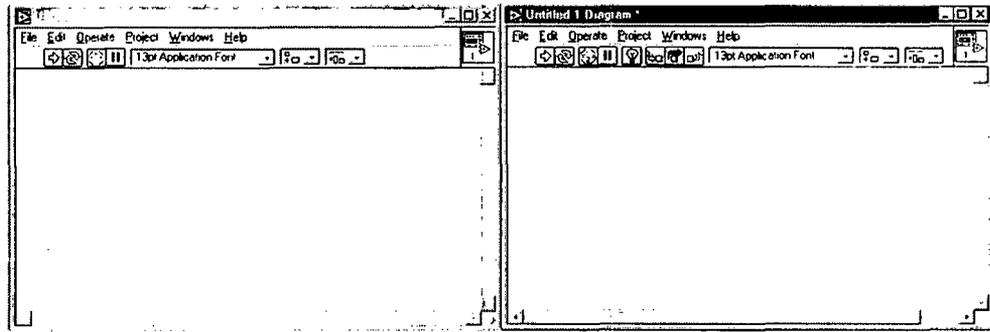
CAPÍTULO II

INTRODUCCIÓN AL USO DE LA PROGRAMACIÓN VISUAL

En este capítulo se discute los aspectos necesarios para familiarizarse con el uso del LABVIEW versión 4.1 de NATIONAL INSTRUMENTS, incluyendo menús, ventanas de diagramación de salida/entrada (**Panel**) y diagramación de flujo de ordenes, subrutinas o bloques (**Diagram**). Asimismo se discuten otros aspectos necesarios como el uso de los modos de edición (**Edit**) y ejecución (**Run**); creación de objetos; herramientas y obtención de ayuda. A los archivos de LABVIEW los llamaremos VI.

2.1 VENTANAS PANEL Y DIAGRAM:

Cada VI tiene dos ventanas separadas, pero relacionadas entre sí. La ventana Panel contiene el panel frontal de nuestro VI. La ventana Diagram es aquella en la cual se construye el diagrama de bloques. Se puede conmutar entre ambas pantallas con el comando Show Panel/Show Diagram (Mostrar Panel / Mostrar Diagrama) del menú Windows (ventana). Usando la combinación de teclas Ctrl+T, dentro de ese mismo menú, podemos posicionar las ventanas Panel y Diagram una al lado de la otra o una encima de la otra.

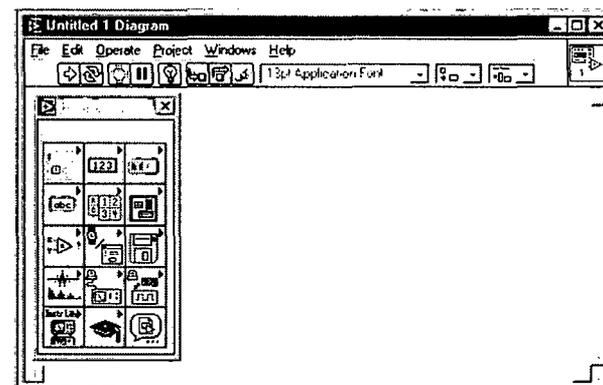
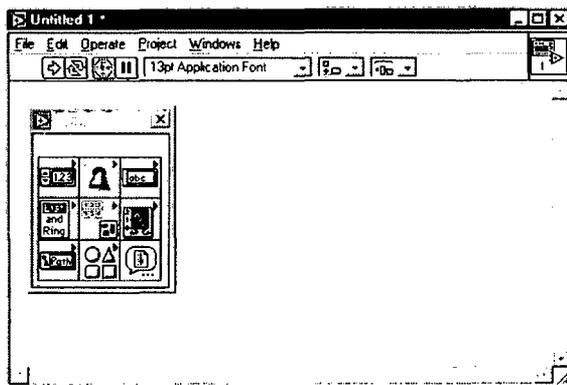


Ventana Panel

Ventana Diagram

2.2 MENUS:

La programación en LABVIEW obliga a utilizar con frecuencia los diferentes menús de la parte superior de la ventana de un VI contiene diversos menús **pull-down** (desplegables). Cuando hacemos clic sobre el ítem o elemento de esta barra, aparece un menú por debajo de ella. Dicho menú contiene elementos comunes a otras aplicaciones Windows, como Abrir (Open), Salvar (Save) y Pegar (Paste), y muchas otras particulares de LABVIEW. La siguiente figura muestra la barra de menú **Functions** reemplaza al **Controls** cuando la ventana **Diagram** está abierta.



File: Sus opciones se usan básicamente para abrir, cerrar, guardar e imprimir VIs.

Edit : Se usa principalmente para organizar el panel frontal y el diagrama de bloques, copiar, pegar y cortar.

Operate : Sus comandos sirven para ejecutar el VI.

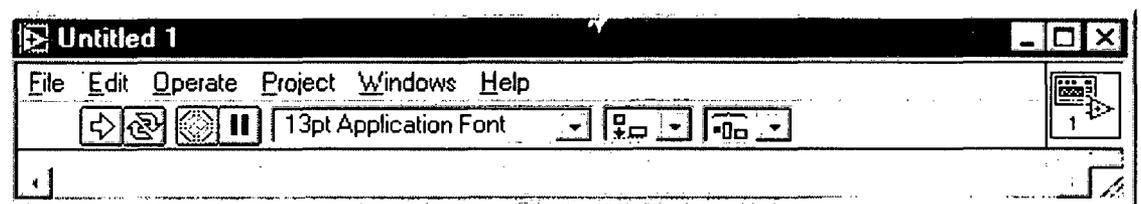
Project: Presenta los niveles de jerarquía, los subVIs que lo integran, los que están sin abrir, busca VIs, etc.

Windows : Se usa para situar rápidamente las ventanas abiertas, mostrar ventanas, mostrar controles/funciones y para abrir ventanas de los diferentes subVIs.

Help : Presenta ayuda sobre los diferentes iconos y otros aspectos de LABVIEW.

2.3 USO DE LOS MODOS EDIT y RUN:

Podemos crear o cambiar un VI cuando este esta en modo **Edit** (Edición). En él, las herramientas de edición se habilitan en la paleta del modo **Edit**, por debajo de la barra de menú de ventana, como se indica a continuación:



Quando estamos listos para probar nuestro VI, hacemos clic sobre el botón de modo o seleccionamos **Change to Run Mode**. Haciendo esto compilamos el VI y lo ponemos en el modo **Run** (Ejecución). En este punto podemos disponer de las opciones de depuración, ejecución del VI, diferentes modos de ejecución, impresión de datos, etc.

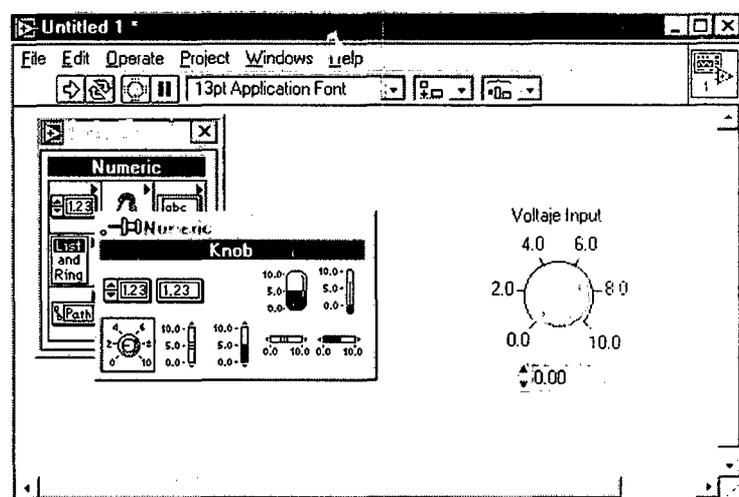
Si lo que queremos es ejecutar el VI desde el modo **Edit** sin pasar al modo **Run**, debemos de hacer clic sobre la flecha de ejecución. Si fuese necesario, LABVIEW compilaría primero el VI, después conmuta al modo **Run**, ejecuta el VI y vuelve al modo **Edit** una vez que el VI se ha ejecutado.

Se puede observar que es aquí donde aparece el tratamiento de los diferentes tipos de letras y la alineación y distribución de objetos. Así mismo vemos que no aparece ninguna herramienta.

 Otro aspecto a destacar es el botón **Pause**. Al hacer clic en el se para la ejecución del VI y vamos al diagrama de bloques, parpadeando la siguiente secuencia que se ejecutará.

2.4 CREACION DE OBJETOS:

Para elaborar el panel frontal hemos de situar sobre él los objetos deseados mediante su selección desde el menú **Controls**. Creamos objetos sobre el diagrama de bloques seleccionándolos desde el menú **Functions**. Por ejemplo, si queremos crear un botón rotatorio sobre el panel frontal, primero hemos de seleccionarlo desde la paleta **Numeric** del menú **Controls**, como se indica:



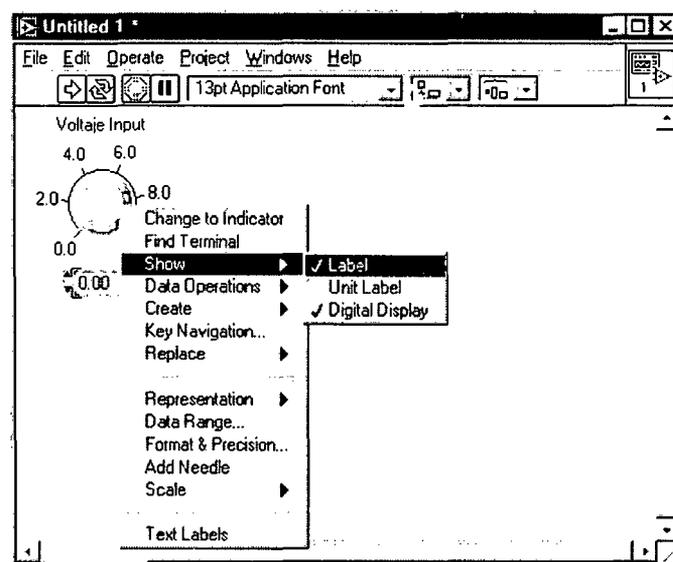
El objeto aparecerá en la ventana Panel con un rectángulo negro o gris que representa una etiqueta de identificación o **Label**. Si queremos usarla en ese mismo momento, introduciremos el texto desde el teclado.

Cuando creamos un objeto sobre el panel frontal, al mismo tiempo se crea el terminal correspondiente sobre el diagrama de bloques. Este terminal se usa tanto para leer datos desde el control como para enviarlos a un indicador.

Si se selecciona **Show Diagram** desde el menú Windows, podremos ver el diagrama correspondiente al panel frontal. Este diagrama contendrá terminales para todos los controles e indicadores del panel frontal.



Todos los objetos en LABVIEW tienen asociados menús **pop-up**, los cuales podemos obtener pulsando el botón derecho del ratón sobre dicho objeto. Mediante la selección de sus diferentes opciones podemos actuar sobre determinados parámetros, como el aspecto o comportamiento de ese objeto.



Por ejemplo, si no hubiéramos introducido texto en la etiqueta del control anterior, ésta habría desaparecido al hacer clic en cualquier otro lado. Para volver a visualizarla tendríamos que obtener el menú **pop-up** de ese control y seleccionar **Label** del menú **Show**.

2.5 HERRAMIENTAS DE LABVIEW:

Una herramienta es un modo de funcionamiento especial del ratón, las usaremos para llevar a cabo funciones específicas de edición o ejecución.

- La herramienta **Operate Value**: Maneja los controles del panel frontal. Es la única herramienta disponible en el modo **Run**.
- La herramienta **Position/Size/Select**: Selecciona, mueve y redimensiona objetos.
- La herramienta **Edit Text**: Crea y edita texto.
- La herramienta **Connect Wire (Wiring)**: Enlaza o conectan objetos del diagrama de bloques y asigna a los terminales del conector VI los controles e indicadores del panel frontal.
- La herramienta **Set Color**: Colorea diversos objetos y los fondos.
- La herramienta **Scroll Windows**: Desplaza la pantalla en la dirección que deseemos para ver posibles zonas ocultas.
- **Set/Clear Breakpoint**: Permite poner tantos puntos de ruptura como deseemos a lo largo del diagrama de bloques. Usando esta misma herramienta para quitar los puntos.
- La herramienta **Get Color**: Permite saber de manera específica que color tiene un objeto, texto u otros elementos.

Se puede cambiar la herramienta haciendo lo siguiente:

- Clic sobre el icono de la herramienta que queremos.
- Usando la tecla tabulador (**TAB**) para seleccionar la siguiente herramienta.
- Pulsando la tecla espaciadora (**SPACE**) para cambiar entre la herramienta **Operating** y **Positioning** cuando la ventana **Panel** esta activa, entre las herramientas **Wiring** y **Positioning** cuando la ventana **Diagram** es la activa.

2.6 AYUDA Y VENTANA DE AYUDA:

La ventana **Help** de LABVIEW[®] ofrece información de funciones, constantes, subVIs, controles e indicadores. Para visualizarla, escoger **Show Help** del menú **Help**. Podemos situar la ventana **Help** en cualquier punto de la pantalla.

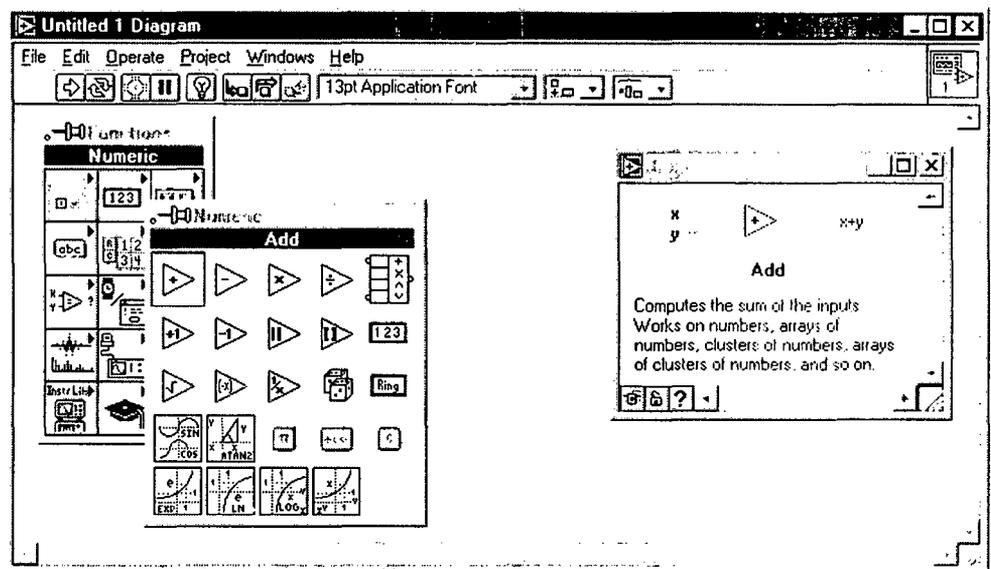
Cuando pasamos el cursor sobre una función, un VI o subVI, la ventana **Help** muestra su icono con los tipos de conexiones apropiados para cada terminal. Las variables de entrada quedan a la izquierda y las de salidas a la derecha. Los nombres de los terminales aparecen junto a cada conexión. Si el VI tiene asociado una descripción, esta se visualizará. Estas descripciones se introducen mediante el dialogo **Get Info** del VI.

Los nombres de los terminales son las etiquetas o **Labels** de los correspondientes controles e indicadores del panel frontal.

Cuando pasamos el cursor sobre una constante universal, la ventana **Help** visualiza su valor. Cuando se pasa un control o indicador, se visualiza la descripción para ese control o indicador en concreto, si existe la información.

Al poner la herramienta **Wiring** sobre una conexión, la ventana **Help** visualiza el tipo de dato transportado por ese cable. Asimismo, cuando se mueve la herramienta **Wiring** sobre el icono del VI, al terminal correspondiente al conector se ilumina en la ventana **Help**.

También podemos usar el comando **Lock Help** del menú **Help** para mantener una ayuda particular en pantalla, de manera que el hecho de mover las diferentes herramientas sobre el diagrama no cambia la visualización de la ventana **Help**. (Ref. 12)

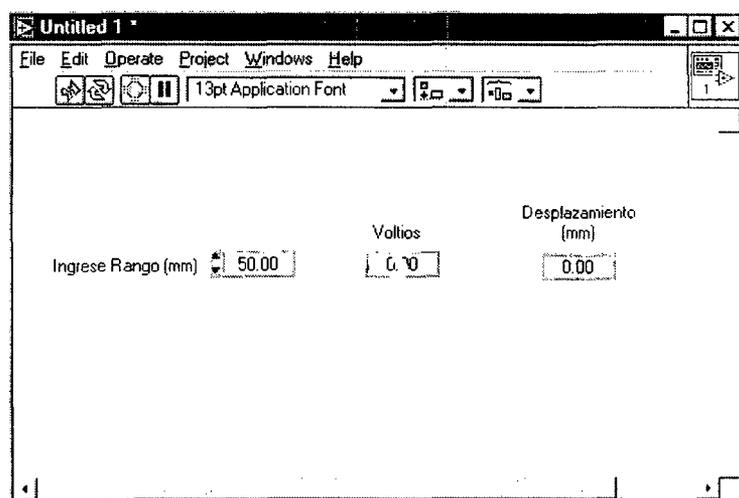


2.7 EJEMPLOS ILUSTRATIVOS:

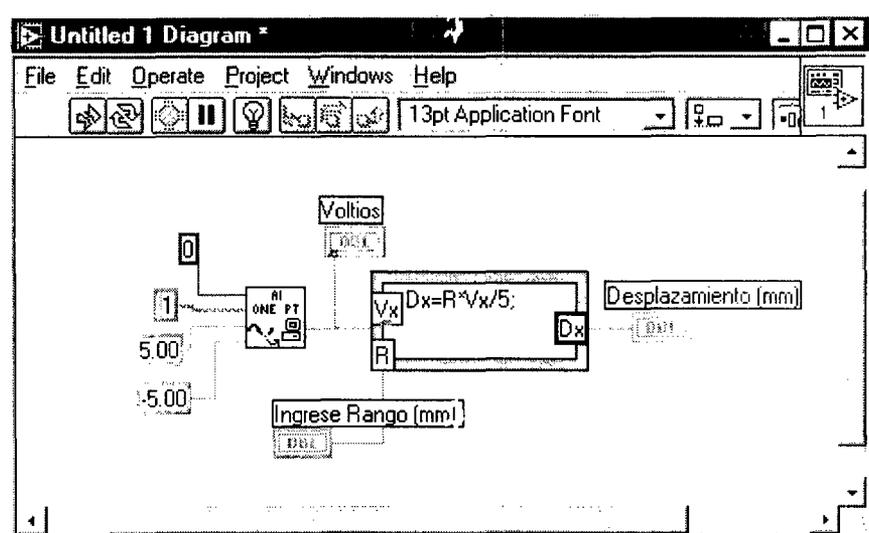
2.7.1 EJEMPLO DE UN CONTROL DE ENTRADA ANALÓGICO (AI SAMPLE CHANNEL)

Crear un sensor dentro de un programa que demande la lectura de datos a través de señales de voltaje. Con LABVIEW es posible realizar esto desde un dispositivo asignado por el dispositivo DAQ durante la configuración (en Windows), para nuestro caso será el dispositivo 0, la cual leerá el voltaje de entrada y transformará la señal a desplazamiento por un sistema de conversión de 5 voltios equivalente a un rango de 50 mm.

El panel frontal quedara de la siguiente manera:



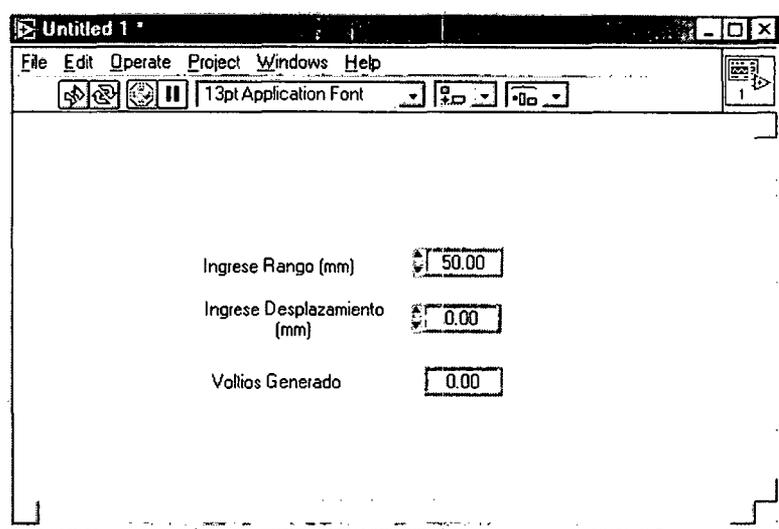
La posible solución para el diagrama de bloques sería:



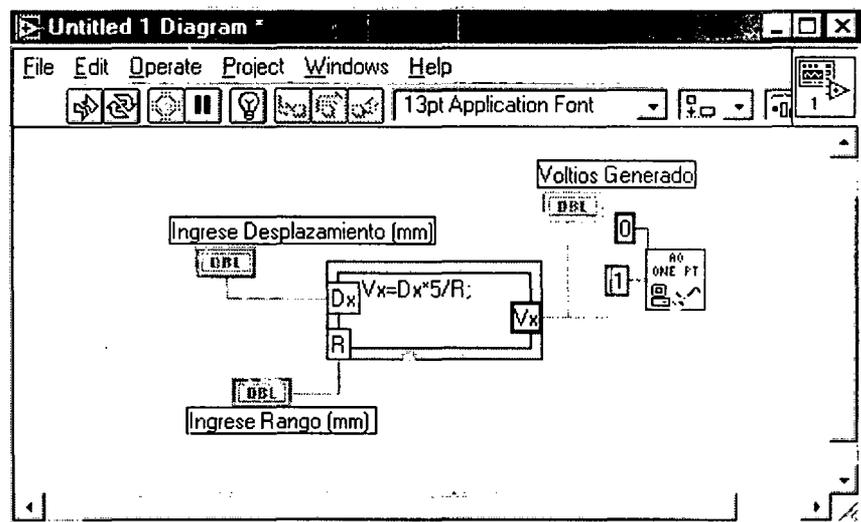
2.7.2 EJEMPLO DE UN CONTROL DE SALIDA ANALÓGICO (AO SAMPLE CHANNEL)

Crear un programa que envíe una señal desde un dispositivo asignado por el dispositivo DAQ durante la configuración (en Windows), para nuestro caso será el dispositivo 0, la cual leerá un desplazamiento de entrada y la transformará a una señal en voltios por un sistema de conversión de 5 voltios equivalente a un rango de 200 mm. En nuestro caso dicho desplazamiento (en voltaje) será lo que se desplace el actuador, la cual fue utilizada en los ensayos Cíclico y Pseudo Dinámico.

El panel frontal quedará de la siguiente manera:



La posible solución para el diagrama de bloques sería:



CAPÍTULO III

APLICACIONES EXPERIMENTALES DE ENSAYOS DE CARGA LATERAL CÍCLICA Y PSEUDO DINÁMICA

3.1 APLICACIONES EN INSTITUTO DE CIENCIA INDUSTRIAL, UNIVERSIDAD DE TOKIO

La prueba on-line llamado también ensayo Pseudo Dinámico, desde la creación de esta técnica ha sido aplicada a varios tipos de sistemas estructurales. La mayoría de las aplicaciones iniciales de la prueba on-line se hizo en el Instituto de Ciencia Industrial de la Universidad de Tokio. La primera aplicación fue hecha por Takanashi, para una estructura aporticada de acero de un nivel y una crujía formada por una viga y dos columnas en perfiles W. En la Fig 3.1(a) se muestra un sistema estructural con las dimensiones básicas. Se consideraba que la viga se encontraba rígida, y, por consiguiente, el punto de inflexión de la columna fue tomado para permanecer en su mitad superior bajo la fuerza horizontal. La viga ensayada fue simplemente apoyada, y, la fuerza concentrada se aplicó verticalmente fue en la parte media de la viga (ver Fig. 3 (b)). Usando esta analogía en la carga, así como las condiciones de apoyo entre el sistema analizado y la viga ensayada, la histéresis del sistema analizado se estimó como la histéresis de la viga. En esta prueba, la rigidez fue

moderada, y el método de aceleración lineal fue empleado para la integración directa.

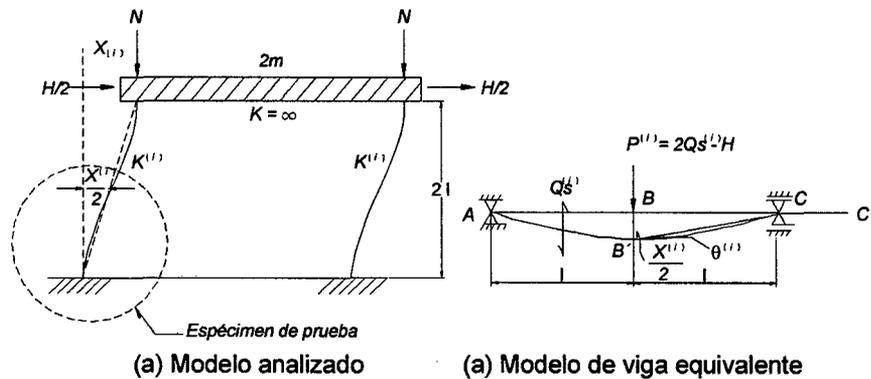
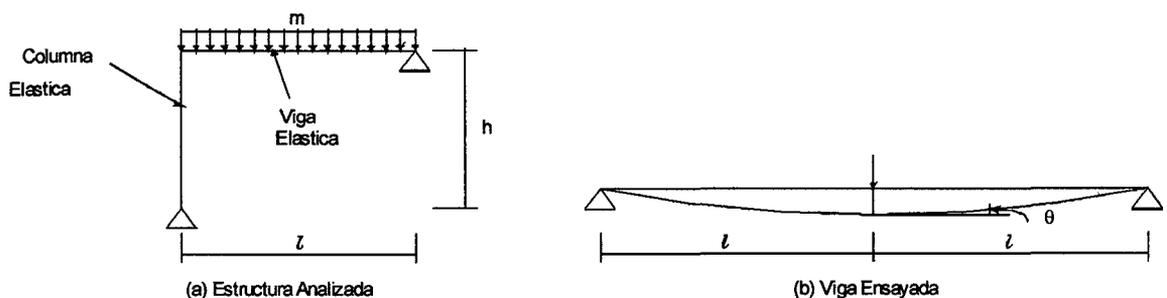
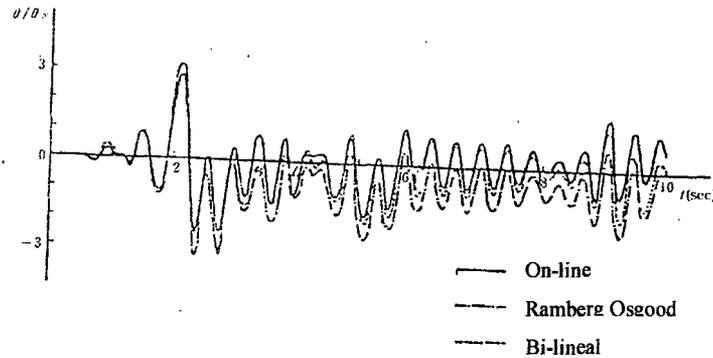


Fig 3.1 Modelo analizado y espécimen de prueba preparado para el ensayo On-Line de un pórtico de acero de un nivel y una tramo. (Ref.3:pag.9)

Udagawa dirigió la prueba on-line de un pórtico de acero de un nivel y un tramo simplemente apoyado, en donde la viga resiste la deflexión inelástica, considerando que las columnas permanecían elásticas. Sólo la parte de la viga fue fabricada para el ensayo, y, análogamente a las referencias, la histéresis del marco fue estimada desde la histéresis de la viga ensayada. La Fig 3.2 muestra el pórtico analizado, la viga ensayada, y uno de los resultados de respuesta inelástica. La Fig 3.2 (c) muestra el tiempo historia de la rotación normalizada del extremo de la viga por la rotación de fluencia, junto con las respuestas obtenidas numéricamente. Este ensayo fue una de las primeras pruebas on-line que habían dado resultados de respuesta exitosos.





(c) Comparación de Espectros de Respuestas en la Viga

Fig 3.2 Modelo analizado y espécimen de prueba preparado para el ensayo On-Line de un pórtico de acero de un nivel y una tramo.(Ref.3:pag.10)

Takanashi extendió la investigación anterior a una prueba on-line de dos niveles y un pórtico de acero de una crujía mostrado en la Fig. 3.3 En este ensayo, se fabricó la estructura entera, y un actuador se conectó a cada nivel del piso donde se asumía que la masa era concentrada. Las vigas del espécimen no estaban rígidas, y el efecto de flexibilidad de las vigas por la fuerza restauradora característica del espécimen fue automáticamente incluido. Además, el método de la diferencia central se usó para la integración directa. La respuesta elástica inicial, sin embargo, fue obtenida usando el método de aceleración lineal con la matriz de rigidez inicial que se había estimado de un análisis preliminar. Tal procedimiento fue empleado porque, en este rango, la respuesta del desplazamiento fue muy pequeña y, por consiguiente, el desplazamiento controlado por el actuador fue sumamente difícil. En esta prueba on-line el algoritmo de control de la prueba fue combinado entre digital-analógico que fue usado por primera vez, y un nuevo algoritmo de carga fue desarrollado para que se ajustaran a las velocidades de carga de los dos actuadores para hacer que los actuadores lleguen al mismo tiempo a los

desplazamientos ordenados respectivamente. Este ensayo fue la primera aplicación de la prueba on-line para un sistema múltiple de grados de libertad.

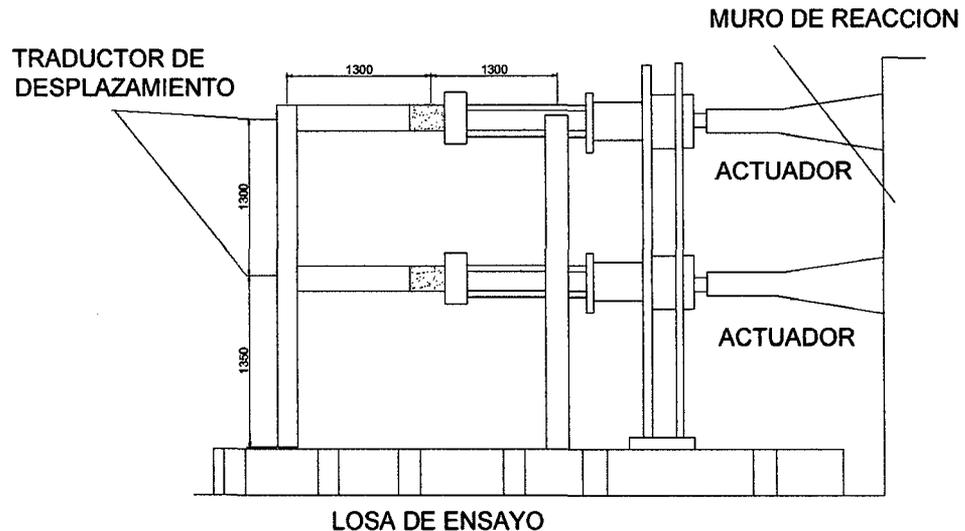


Fig 3.3 Montaje Del Especimen Para el Ensayo On-Line en un Pórtico De Acero De Dos Niveles Y Un Tramo.(Ref.3:pag.11)

Takanashi dirigió la prueba on-line de un pórtico de viga-columna de acero conectados por pernos de alta resistencia. Los sistemas analizados fueron de uno y varios niveles y un tramo, formado por un pórtico de acero con columnas elásticas simplemente apoyadas y vigas flexibles que fueron conectadas a los extremos de las columnas por pernos de alta resistencia. Semejante a su prueba anterior, un espécimen viga fue fabricado y se ensayó considerando la relación entre el ángulo de rotación del sistema analizado y el ángulo de rotación del espécimen viga. La Fig 3.4 muestra uno de los especímenes ensayados y la curva de histéresis obtenida con lo cual se manifiesta el súbito cambio de la fuerza resistente causado por el deslizamiento de los pernos. De este ensayo se encontró que la prueba on-line era capaz de reproducir el complejo comportamiento histerético incluyendo el súbito cambio

en la resistencia de la fuerza. Basándose en lo obtenido por la curva de histéresis, ellos desarrollaron un modelo matemático que representaría el comportamiento histerético de las juntas con los pernos de alta resistencia.

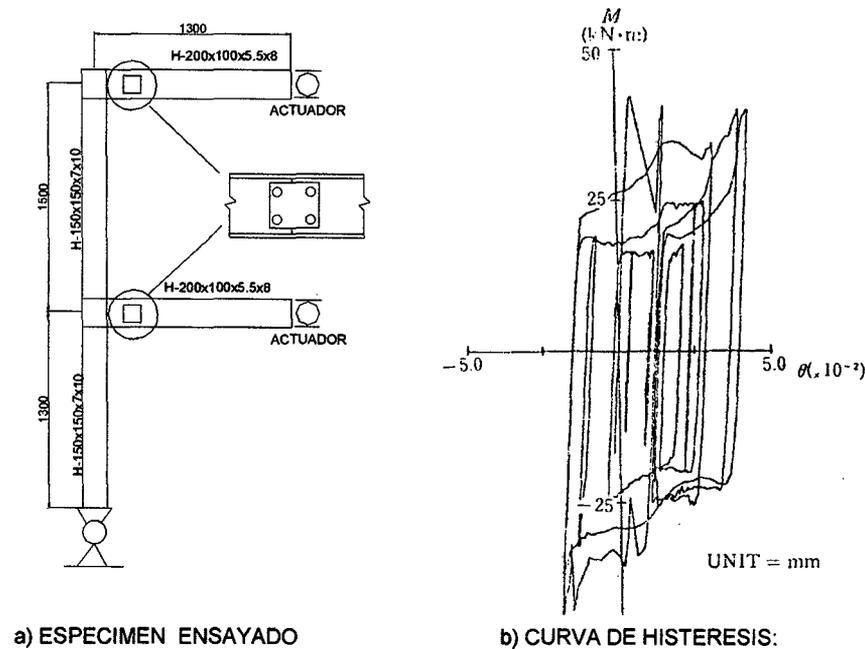


Fig 3.3 Montaje Del Especimen Para el Ensayo On-Line en la conexión viga-columna y su curva de hysteresis después del ensayo.(Ref.3:pag.13)

Taniguchi ejecutó la prueba on-line de viga-columnas de perfiles de acero tipo H sometida a flexión biaxial. En su prueba, a una columna sujeta en ambos extremos se le trató como un sistema de dos grados de libertad y recibió a la mitad de su altura fuerzas concentradas con respecto a los ejes fuertes y débiles de la columna, considerando que la fuerza axial aplicada a la columna era constante. Ellos investigaron el comportamiento histerético de la columna bajo aceleraciones de entrada independientes a los dos ejes, encontrando:

- 1) que la respuesta del comportamiento puede diferir significativamente bajo la condición de carga uniaxial que bajo la condición de carga biaxial, 2) que la

gran deflexión inelástica en el eje fuerte causó una influencia significativa sobre la histéresis del eje débil, mientras la gran deflexión inelástica del eje débil afectó sólo un poco la histéresis del eje fuerte, y 3) que el daño de las columnas bajo carga biaxial puede estimarse razonablemente desde la entrada de energía en cada dirección combinada con la capacidad de disipación de energía de las columnas bajo carga monotónica en cada dirección.

Okada y Seki investigadores de la Universidad de Tokio, usando la técnica de la prueba on-line, analizaron un pórtico de un nivel de concreto reforzado cuyas vigas se consideraron como infinitamente rígida. Los especímenes de prueba fueron vigas de concreto reforzado que recibían una fuerza lateral concéntrica a la mitad de la luz y estaba simplemente apoyada en los extremos. En la Fig. 3.5 se muestra el espécimen y uno de los sistemas analizados.

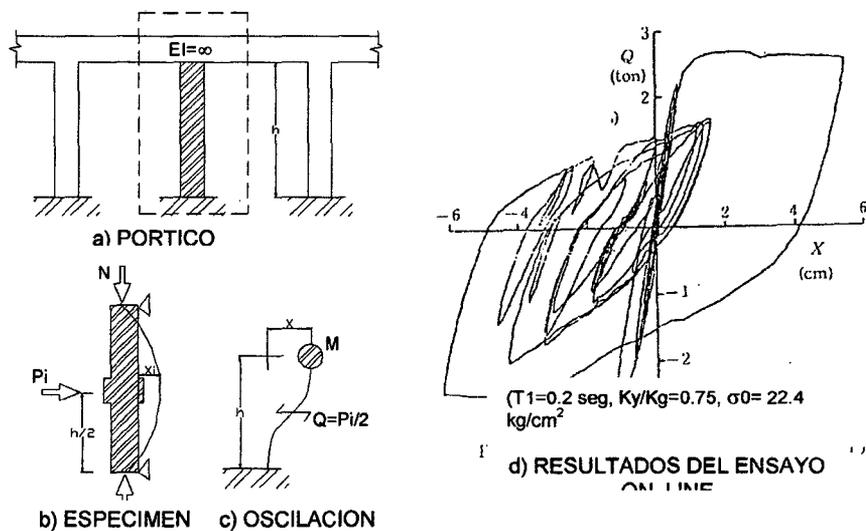


Fig 3.5 Montaje Del Especimen Para El Ensayo On-Line En Un Pórtico De Concreto Reforzado.(Ref.3:pag.13)

Esta prueba fue la primera aplicación de la prueba on-line al sistema de concreto reforzado y verifica que la prueba on-line es capaz de simular la

respuesta del comportamiento de estructuras de concreto reforzado incluyendo el agrietamiento del concreto así como la deformación de las barras de refuerzo.

Okada realizó ensayos on-line en pórticos espaciales de un nivel y una crujía teniendo como elementos columnas de concreto reforzado y un muro de corte bajo una condición de carga biaxial. Similarmente fueron aplicadas dos aceleraciones de entrada independientes en los dos ejes horizontales. En la Fig. 3.6 se muestran las dimensiones básicas del espécimen de prueba. De los resultados del ensayo, ellos encontraron que el desplazamiento de respuesta puede incrementarse significativamente en la condición de carga biaxial comparándolos con la condición de carga uniaxial y que la respuesta puede ser afectada mucho por la cantidad y orden del muro de corte.

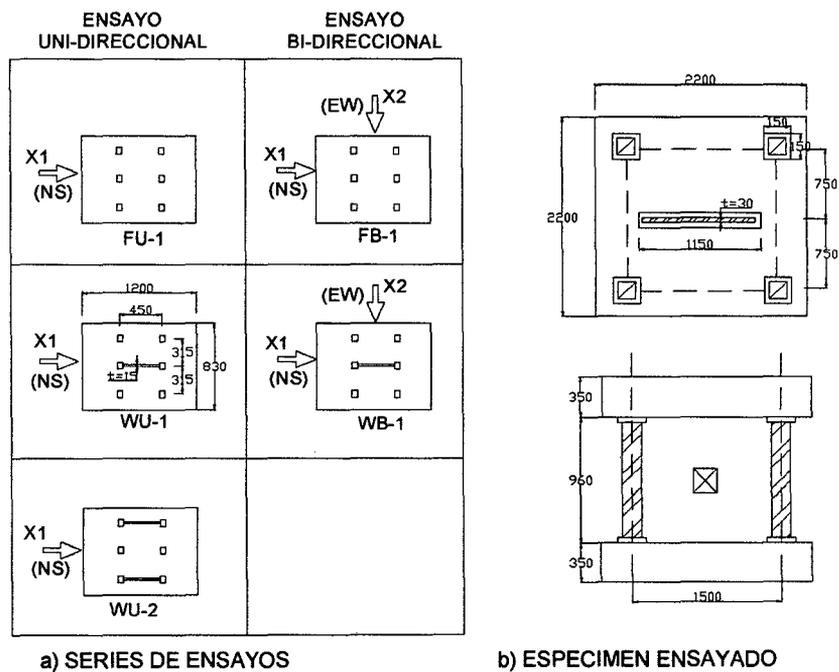
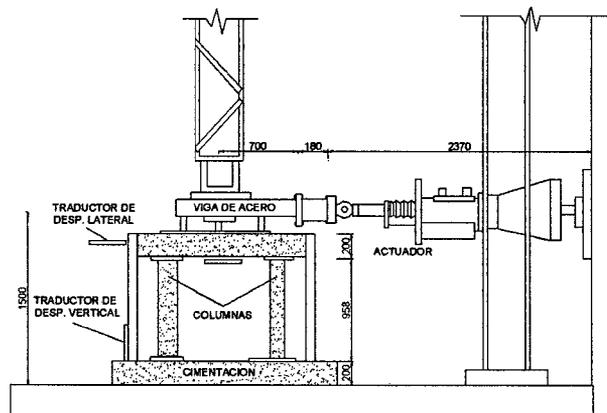


Fig 3.6 Ensayo On-Line De Carga Biaxial En Un Pórtico De Concreto Reforzado.
(Ref.3:pag.14)

Seki y Okada también emplearon la prueba on-line con pórticos espaciales de un nivel conformados por columnas de concreto reforzado y un

muro de corte bajo una condición de carga uniaxial, a fin de investigar el comportamiento torsional de los pórticos espaciales causados por la excentricidad entre el centro de masa y el centro de corte de los elementos. En la Fig. 3.7 se muestran los cuatro especímenes ensayados, junto al equipo de ensayo. Ellos encontraron:

- 1) Que la torsionalidad acoplada con la resistencia al corte así como la rigidez disminuyen con el aumento de la excentricidad.
- 2) Que la resistencia se redujo a la mitad en el que tiene un muro de corte, y además.
- 3) Que las columnas menos rígidas sufrieron respuestas de desplazamiento amplificadas debido a la acción torsional, resultando con daños más severos que en la condición de carga desacoplada.



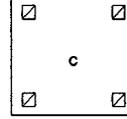
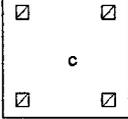
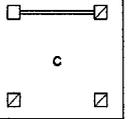
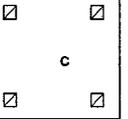
PORTICO #	EFU 01	EFU 11	EWU 11	EFU 21
LOCALIZACION DE LOS MUROS DE CORTE				
TIPO DE PORTICO	CUATRO COLUMNAS		TRES COLUMNAS Y UN MURO DE CORTE	CUATRO COLUMNAS
	DIRECCION X			

Fig 3.7 Ensayo On-Line En Un Pórtico De Concreto Reforzado Con La Excentricidad Entre El Centro De Masas Y El Centro De Corte.(Ref.3:pag.15)

Teshigawara dirigió la prueba on-line en pórticos con subuniones de múltiples niveles de elementos de concreto reforzado, las uniones fueron tratadas como un sistema de dos grados de libertad, y después la prueba on-line de subuniones de sistema de muros de corte de concreto reforzado. El muro de corte fue considerado rígido pero se le incluyó la rotación en la base causada por el levantamiento de la base. Entonces, el muro de corte fue representado por una unión de acero que tiene una alta rigidez en su plano y un pin en su base, y los límites de la viga de concreto reforzado fueron conectados rígidamente al borde de la unión de acero. En esta prueba, las subuniones se trataron como un sistema de dos grados de libertad. Ellos encontraron de estos ensayos que el comportamiento del pórtico de concreto reforzado y la interacción compleja entre el muro de corte y el límite de las vigas podrían ser analizadas razonablemente con la prueba on-line. (**Ref. 3 – pag. 9-14**)

3.2 APLICACIONES POR EL INSTITUTO DE INVESTIGACIÓN EN LA CONSTRUCCIÓN, DEL MINISTERIO DE CONSTRUCCIÓN

El Instituto de Investigación en la Construcción (BRI) del Ministerio de Construcción fundado en 1978 con un laboratorio de ensayos para estructuras a escala natural. La factibilidad del sistema de prueba on-line fue verificada por Yamanouchi para un pórtico de dos niveles y un tramo de acero con elementos braces y por Kaminosono para un pórtico de cuatro niveles y un tramo de acero con elementos braces. En estos estudios, se verificó la aplicabilidad de la combinación de algoritmos de cargas digital-analógico explicados en el Capítulo IV, y se demostró que la prueba on-line puede aplicarse razonablemente para sistemas con muchos grados de libertad.

Se realizaron dos ensayos on-line a escala natural en este Laboratorio con la colaboración del Programa de Investigación Cooperativa Japón-U.S. El primer espécimen a gran escala fue construido para escala natural una edificación de concreto reforzado de dos por tres tramos y siete niveles con un muro de corte como el elemento resistente para la mayor fuerza lateral. Las dimensiones básicas de la estructura así como el equipo de ensayo es ilustrado en la Fig. 3.8. En la prueba on-line se asumió que la estructura era un sistema de un grado de libertad con una distribución de fuerza sísmica en forma triangular invertida sobre su altura. Entonces, sólo los actuadores instalados para aplicar la fuerza lateral al nivel del techo fueron desplazamientos controlados de acuerdo con el procedimiento de la prueba on-line, considerando que los otros actuadores fueron controlados por la fuerza, cuya magnitud se determinó para una fuerza específica distribuida sobre la altura así como la fuerza aplicada por los actuadores al nivel del techo. Se preparo un programa de ensayos de fases múltiples. Primero, la estructura fue ensayada ingresado datos de pequeñas aceleraciones para examinar el comportamiento de serviciabilidad de la estructura; luego, por medio de grandes aceleraciones para investigar el desempeño de la estructura bajo grandes excitaciones sísmicas. Después, fueron reparados los daños ocurridos durante el ensayo, y se acondicionaron varios elementos no estructurales; como muros de tabiquería, vidrios de las ventanas, y fueron instalados los sistemas de conducción en la estructura. La estructura así fue reparada y decorada con elementos no estructurales para ser nuevamente ensayada para examinar el comportamiento de la reparación e interacción entre la estructura y elementos no estructurales. Además, se usó un generador de excitación para el ensayo de vibración que se realizó después de la prueba individual on-line para estudiar

las características de vibración de la estructura en esa fase individual. En la figure 3.9 se muestra un tiempo historia de desplazamiento y las curvas de histéresis obtenidas de la prueba on-line de la estructura con grandes aceleraciones de entrada.

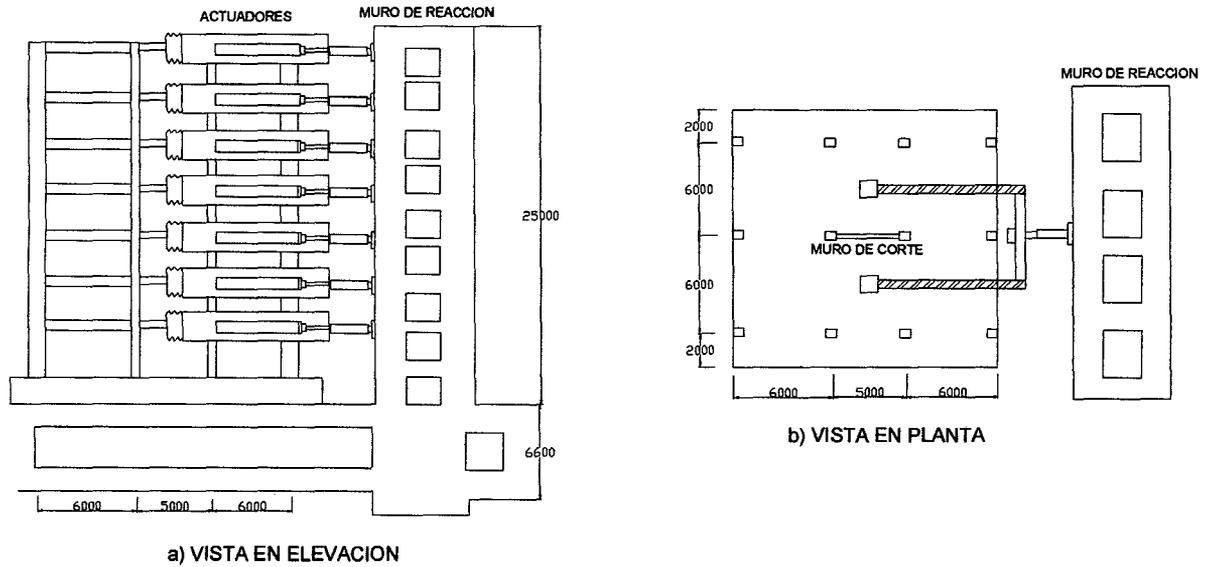


Fig 3.8 Montaje De Una Edificación De Concreto Reforzado A Escala Natural De 7 Niveles.(Ref.3:pag.16)

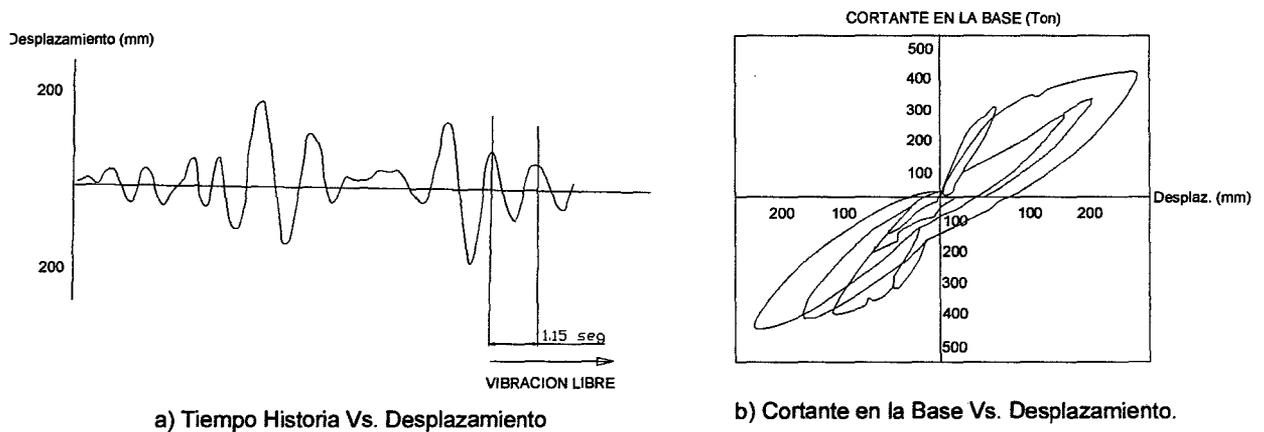


Fig 3.9 Curvas De Tiempo Historia De Desplazamiento Y Curva De Histéresis Obtenidos Del Ensayo On-Line De La Edificación De Concreto Reforzado A Escala Natural De 7 Niveles.(Ref.3:pag.16)

La segunda prueba on-line a gran escala fue ejecutada usando acero con elementos braced con dos tramos en ambos sentidos y de seis niveles. En la Fig. 3.10 se muestran las dimensiones básicas de la estructura. Esta vez, la estructura se trató como un sistema de seis grados de libertad y cada masa fue supuesta concentrada en cada nivel de piso. Similarmente al ensayo a escala natural de la estructura de concreto reforzado, la prueba fue dirigida de acuerdo con un programa de ensayo de fase múltiple.

Como se describió anteriormente, la prueba on-line es una técnica capaz de simular directamente el comportamiento de respuesta sísmica de un sistema estructural, pero no debemos pasar por alto que la prueba incluye varias suposiciones, simplificaciones, y aproximaciones en el curso del modelamiento y ensayo. Para evaluar el grado de exactitud de la conducta de la respuesta obtenida de la prueba on-line en relación con el comportamiento de respuesta sísmica real, BRI realizó una serie de estudios de correlación entre la mesa vibradora y las pruebas on-line. En el estudio de la correlación, fueron fabricadas dos especímenes idénticos. Un espécimen fue ensayado dinámicamente usando un dispositivo de mesa vibradora, considerando que el otro espécimen fue ensayado con el sistema de prueba on-line. Para asegurar la identidad entre las dos aceleraciones de entrada, la prueba de mesa vibradora fue ensayada primero, y, luego, la prueba on-line fue ejecutada usando el registro de aceleración obtenido del ensayo de la mesa vibradora.

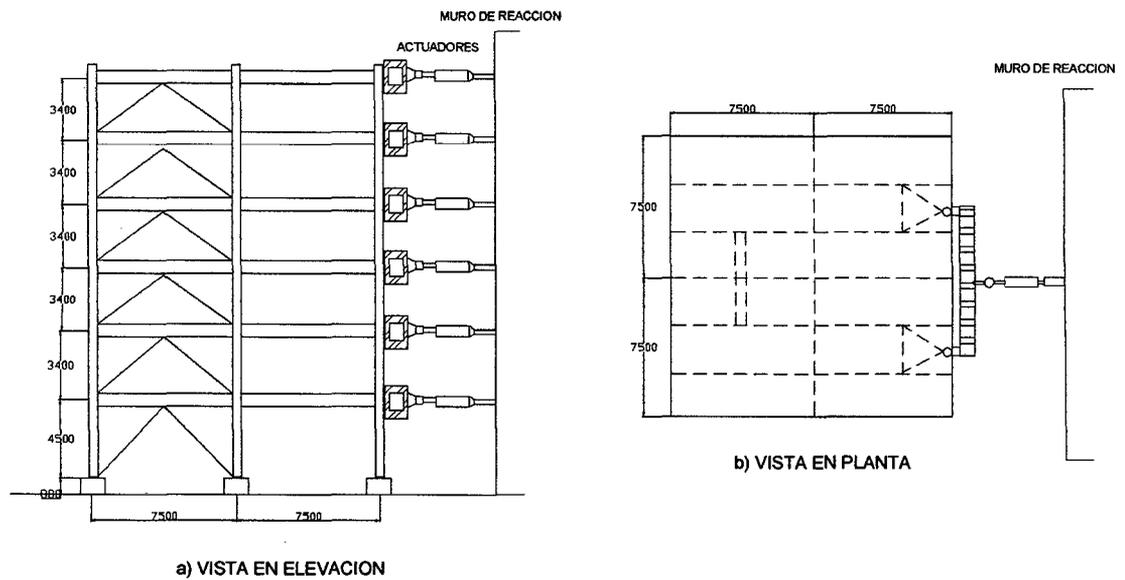


Fig 3.10 Montaje De Una Edificación De Acero A Escala Natural De 6 Niveles.(Ref.3:pag.17)

Kubota realizó el estudio de correlación para un pórtico de concreto reforzado de un tramo y con dos niveles. El espécimen de prueba usado para el ensayo en su estudio se muestra en la Fig. 3.11. La correlación entre los dos ensayos fue hallada siendo generalmente razonable, pero la diferencia entre la fuerza de corte y el tiempo historia del desplazamiento no fueron despreciables. Kitagawa, después extendido este estudio, indicando que la diferencia puede haber sido causada por un efecto combinado de tensión y relajación del esfuerzo. Para verificar su especulación, dirigió un análisis numérico usando un modelo de Maxwell que incluye la viscosidad elástica y el comportamiento plástico, en donde el coeficiente de amortiguamiento viscoso fue estimado separadamente al experimento dirigido.

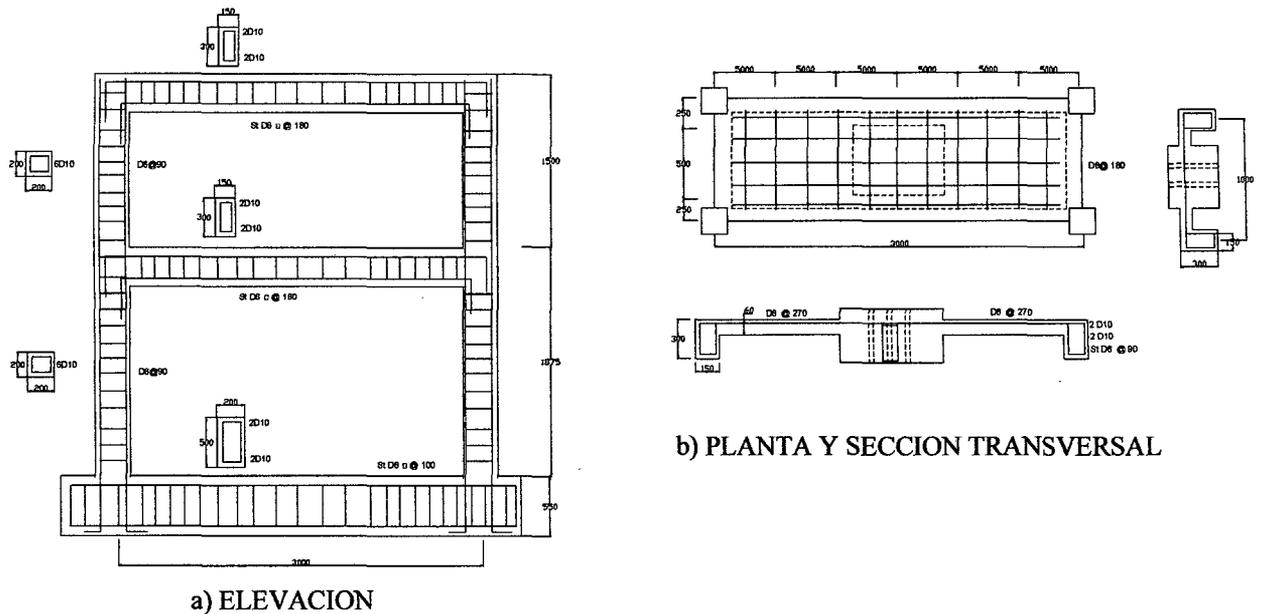


Fig 3.11 Montaje De Un Espécimen Para El Ensayo On-Line Y Mesa Vibradora En Un Pórtico De Concreto Reforzado De Dos Niveles Y Un Tramo.(Ref.3:pag.18)

Yamazaki, aplicó el estudio de la correlación a un pórtico de acero de dos niveles y un tramo con y sin elementos braces. En la figura 3.12 se muestra el espécimen de prueba de dos niveles y con elementos braces y los resultados de la respuesta obtenidas de la mesa vibradora y la prueba on-line aplicadas al espécimen. Ellos compararon los resultados de los ensayos obtenidos de las dos pruebas con el tiempo como dominio de la frecuencia, indicando que la prueba on-line puede simular con gran exactitud el comportamiento de la respuesta sísmica real de los sistemas ensayados. Ellos adicionalmente aplicaron la técnica de la identificación del sistema para obtener los resultados del ensayo y formularon los modelos analíticos representando la respuesta del ensayo en mesa vibradora y on-line. Comparando estos modelos analíticos derivados, ellos concluyeron que la variación de la carga tenía un gran efecto secundario sobre la respuesta de los sistemas analizados. (Ref. 3 – pag. 14-19)

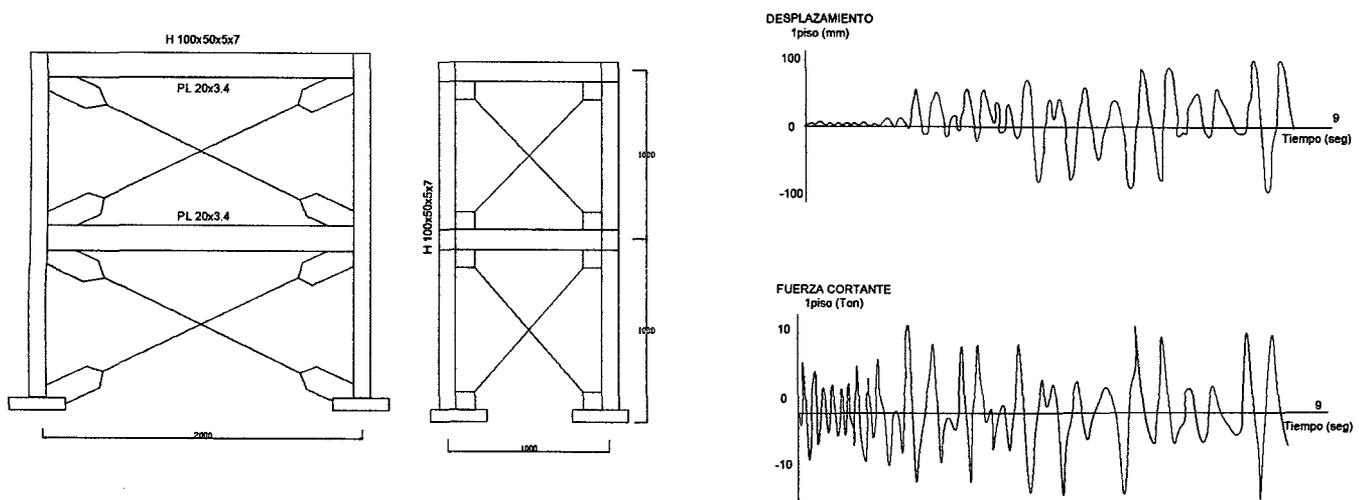


Fig 3.12 Montaje De Un Espécimen Para El Ensayo On-Line Y Mesa Vibradora En Un Pórtico De acero Reforzado con Breces De Dos Niveles Y Un Tramo, Y Comparación De La Respuesta Tiempo Historia.(Ref.3:pag.18)

3.3 APLICACIONES EN OTRAS INSTITUCIONES DE LA INVESTIGACIÓN

Sobre una docena de otras instituciones de investigación japonesa que tienen su propio sistema de prueba on-line. Mochizuki, de Tokio Metropolitan University, realizó la prueba on-line de pilas empotradas en suelo cohesivo para investigar el comportamiento de la fuerza lateral resistente de las pilas y su interacción con una superestructura. En su estudio, el sistema suelo-estructura fue considerado un sistema con dos grados de libertad: un grado para la pila y el otro grado para la superestructura, y sólo la parte de la pila fue ensayada con la prueba on-line.

Kaneta, de la Universidad de Kyoto hizo pruebas on-line controladas por un sistema de microcomputadoras inventadas por ellos para estudiar el

comportamiento de respuesta sísmica de la base de sistemas de acero estructural y viga-columna conectados con pernos.

Nishigaki y Mizuhata de la Universidad de Kobe dirigieron la prueba on-line de columnas de concreto reforzado y concreto reforzado con fibras de acero para examinar el comportamiento de fatiga ante la acción cíclica de cargas sísmicas.

Miyazawa de la Universidad de Kogakuin examinó la viabilidad de su sistema en la prueba on-line usando un pórtico de acero de un nivel y un tramo colocando arriostre diagonal.

Hayama del Instituto de Investigación Técnica de Hazama-gumi, realizó la prueba on-line en un pórtico arriostrado de acero de tres niveles y un solo tramo.

Kobayashi, del Instituto de Investigación Técnica de Taisei, realizó la prueba on-line de un pórtico de concreto reforzado y utilizó los resultados para demostrar la validez de un modelo matemático de histéresis propuesto por él.

Mizoguchi del Instituto Tecnológico de Muroran, realizó la prueba on-line de pórticos espaciales de concreto reforzado e investigó el comportamiento torsional de los pórticos ante la acción de aceleraciones uniaxiales.

Ishimaru de la Universidad de Nihon desarrolló su propio sistema de prueba on-line. Examinó la confiabilidad y exactitud de sus algoritmos de carga

y demostró la validez de su sistema en pruebas on-line en pórticos de acero y concreto reforzado.

Además, los autores son conscientes que muchas otras instituciones de investigación han desarrollado recientemente o están desarrollando sus propios sistemas de prueba on-line. Ellos son la Universidad de Kinki, el Instituto de Tecnología Aichi, el Instituto Tecnológico de la Construcción de Kumagai-gumi, el Instituto Técnico de Investigación de Ohbayashi-gumi, el Instituto de Investigación Okumura-gumi, y el Laboratorio de la Investigación Técnica de Takenaka. (*Ref. 3 – pag. 19*)

3.2 APLICACIONES POR EL CENTRO PERUANO JAPONÉS DE INVESTIGACIONES SÍSMICAS Y MITIGACIÓN DE DESASTRES.

Existen estudios realizados por este centro de investigación ya sea por convenios con instituciones privadas y/o estatales o por tesis para optar el título de Ingeniero Civil, entre las cuales tenemos:

- **“Ensayos De Simulación Sísmica en Modelos de Albañilería”,** Tesis realizada por Gladys Cuadros O. (Lima 1991).
- **“Estudio Experimental de Pórticos de Concreto Armado a Escala $\frac{3}{4}$ Sometidos a Ensayos de Simulación Sísmica”,** Tesis realizada por Daniel Enrique Rios Padilla (Lima 1994); Uno de los objetivos de este estudio fue efectuar la comparación de los resultados del análisis teórico con los resultados experimentales en una estructura real, para así identificar

los parámetros, que más afectan en el comportamiento inelástico de las estructuras.

- **“Desarrollo De Un Sistema Constructivo Con Estructura De Paneles Plegados Y Cerramiento De Mortero Reforzado Con Malla Electrosoldada”**. Convenio SENCICO-CISMID (2001). En este estudio se pudo realizar ensayos pseudo dinámicos a muros de paneles plegados, un módulo de vivienda de un nivel y próximamente a un módulo de vivienda de dos niveles. Llegando a la conclusión que este nuevo sistema constructivo ante eventos sísmicos resulta muy flexibles. Este ensayo nos proporcionó información acerca del comportamiento real del sistema estructural debido a la naturaleza de su escala real. Nos permitió apreciar el comportamiento de la unión de los componentes y su interacción bajo desplazamientos controlados; siendo posible observar el comportamiento entre panel-losa, panel-perfil, panel-cimiento.

CAPITULO IV

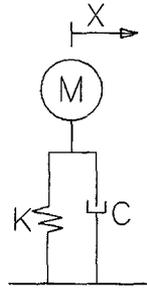
FUNDAMENTO TEORICO DE LOS ENSAYOS EN LÍNEA

Los ensayos experimentales en línea se realizan con los siguientes objetivos:

- Conseguir información para la evacuación de las estructuras antes y después de las acciones inesperadas.
- Desarrollar modelos histeréticos para ser usados en análisis estructural teórico, análisis elástico e inelástico.
- Proponer límites de fuerza, desplazamientos a ser usados en normas, obteniendo la información necesaria para complementar reglamentos.

4.1 ECUACION DE MOVIMIENTO:

Para determinar la respuesta sísmica en sistemas estructurales, durante movimientos sísmicos nos podemos basar en el principio de D’Alambert, que establece que un sistema puede ser puesto en estado de equilibrio agregando a las fuerzas externas una fuerza ficticia, comúnmente conocida como fuerza de Inercia.



$$M \ddot{X} + C \dot{X} + K X = F(t) \dots\dots(4.1)$$

donde:

$M \ddot{X}$ = Fuerza de Inercia

$C \dot{X}$ = Fuerza de Amortiguamiento

$K X$ = Fuerza Restauradora.

$F(t)$ = Fuerza de Excitación.

En el caso de los ensayos en línea la fuerza restauradora ($K \cdot X$) es medida directamente del espécimen a través de celdas de carga.

Para la solución de la ecuación de movimiento que representa un sistema de ecuaciones diferenciales lineales de segundo orden, para su solución existen técnicas numéricas de gran eficiencia, siendo éstas:

- a) Integración Directa.
- b) Superposición de Modos.

a) Método de Integración Directa:

Es la técnica utilizada para resolver la ecuación de movimiento y es usada en el ensayo Pseudo Dinámico, usando sistemas de actuadores. Asimismo si se aplica la fuerza excitadora en la base de la estructura, se tiene una simulación con mesa vibradora.

Se trata de un método de integración paso a paso, permitiéndose dos ideas básicas.

La solución no es conforme para todo tiempo, si no solamente en intervalos discretos de Δt , existiendo las siguientes técnicas de uso frecuente:

- Método de Diferencia Central.
- Método de Houbolt.
- Método de Wilson
- Método de Newmark. (**Ref. 10**)

b) Superposición de Modos:

La fuerza Dinámica de la ecuación de equilibrio (4.1) puede ser reescrita en la siguiente forma como un grupo de N ecuaciones diferenciales de segundo

orden:
$$Mu(t) + C\dot{u}(t) + Ku(t) = F(t) = \sum_{j=1}^j f_j * g(t)_j \dots\dots(4.2)$$

Todos los posibles tipos de carga en función del tiempo, incluyendo viento, onda y sismo, pueden ser representadas por una sumatoria de vectores "j" espaciados cada "f_j", los cuales no son una función del tiempo, y "j" funciones del tiempo g(t), donde "j" no puede ser mayor que el número de desplazamientos "N".

El método matemático fundamental en el cual es usada la solución de la ecuación (4.2) es la separación de las variables. Esta aproximación supone que la solución puede ser expresada de la siguiente forma:

$$u(t) = \phi Y(t) \dots\dots(4.3)$$

Donde ϕ es una matriz "NxL" que contiene "L" vectores los cuales no son una función del tiempo, y $Y(t)$ es un vector que contiene "L" funciones del tiempo. De La ecuación (4.3) resulta que:

$$\dot{u}(t) = \phi \dot{Y}(t) \dots\dots(4.4)$$

$$u(t) = \phi Y(t) \dots\dots(4.5)$$

Antes de resolver la ecuación, requerimos que las funciones satisfagan las condiciones de ortogonalidad de masa y rigidez:

$$\phi^T M \phi = I \quad \text{y} \quad \phi^T K \phi = \Omega^2 \quad \dots\dots(4.6)$$

Donde "I" es una matriz diagonal unitaria y " Ω^2 " es una matriz diagonal, la cual puede o no contener las frecuencias de vibración libre. Se debe notar que los principios de la matemática no colocan restricciones sobre estos vectores. Todos los vectores son normalizados para generalizar la masa $\phi_n^T M \phi_n = 1$.

Después de reemplazar los datos en la ecuación (4.2) y multiplicar por ϕ^T la siguiente matriz de "L" ecuaciones es reducida a:

$$I \ddot{Y}(t) + d \dot{Y}(t) + \Omega^2 Y = \sum_{j=1}^L p_j g(t)_j \quad \dots\dots(4.7)$$

Donde $P_j = \phi^T f_j$ son definidos como los factores de participación modal en función del tiempo "j". El termino P_{nj} es asociada con el eneaavo modo.

Para todas las estructuras reales de matriz "LxL" d no es diagonal; sin embargo, para ordenar las ecuaciones modales desacopladas es necesario suponer que no hay acoplamiento entre los modos. No obstante, se supone que la diagonal está definida por los términos de amortiguamiento modal:

$$d_m = 2\xi_n \omega_n \dots (4.8)$$

Donde ξ_n esta definido como la proporción de amortiguamiento en el modo "n" al amortiguamiento critico del modo. (**Ref. 13**)

Una ecuación modal típica desacoplada, para sistemas estructurales lineales es de la siguiente forma:

$$y(t)_n + 2\xi_n \omega_n \dot{y}(t)_n + \omega_n^2 y(t) = \sum_{j=1}^J P_{nj} g(t)_j \dots (4.9)$$

4.1.1 ENSAYOS ESTÁTICOS

4.1.1.1 PRUEBA DE CARGA LATERAL MONOTÓNICA:

Esta técnica permite estudiar el comportamiento de las estructuras afectadas a cargas equivalentes o desplazamiento (según sea la técnica de ensayo), crecientes en una dirección. Se trata de un ensayo estático pero con una diferencia; que se plasma en la forma de aplicación de la carga.

Dentro de esta técnica de simulación sísmica existen dos formas de realizar los ensayos:

1. **Ensayo Estático por Desplazamiento:** Este tipo de ensayo es controlado a través de desplazamientos previamente determinados ($x_1, x_2, x_3, \dots, x_n$) correspondientes al espécimen en el eje de aplicación de la carga, de acuerdo a las distorsiones a las cuales se desee llegar. Para ello se envían señales al actuador para que aplique al espécimen un desplazamiento tal que se desplace un Δx cada vez hasta llegar al desplazamiento objetivo final x_1 . Cuando el objetivo final es alcanzado con cierto grado de aproximación, se procede de igual manera hasta alcanzar el objetivo final x_2

y así sucesivamente para cada uno de los desplazamientos predeterminados.

2. **Ensayo Estático por Fuerza:** Este tipo de ensayo es controlado a través de la fuerza de aplicación de carga lateral, para ello se deben calcular previamente las fuerzas requeridas (F_1, F_2, \dots, F_n), para mover el espécimen un cierto desplazamiento. Es necesario realizar varios pasos para llegar al objetivo final, cada paso consiste en incrementar la fuerza de aplicación de carga en un ΔF hasta que obtengamos el objetivo final F_1 con un cierto grado de aproximación. Este procedimiento debe repetirse para cada uno de los puntos de control predeterminados.

4.1.1.2 PRUEBA DE CARGA LATERAL CICLICA:

Este tipo de prueba es muy similar a la prueba de carga lateral monotónica, la diferencia se encuentra en que este ensayo es realizado en dos direcciones (empujando y jalando). Cada vez que llegamos a un punto de control límite (sea desplazamiento o fuerza) se procede a descargar el espécimen, para cada punto límite se realizan por lo menos dos ciclos de carga y descarga tanto empujando como jalando. Además, nos permite estudiar los diversos componentes y modelos y es la más usada.

Dentro de esta técnica de simulación sísmica existen dos formas de realizar:

1. Ensayo Estático por Desplazamiento Controlado.
2. Ensayo Estático por Fuerza Controlada.

En este tipo de ensayos estáticos la ecuación (4.1) se reduce a: $K * X = F(t)$, donde el desplazamiento horizontal es controlado por distorsiones, $F(t)$ viene a ser la carga aplicada por el actuador para dicho desplazamiento, obteniendo el tiempo historia de desplazamiento independiente del tiempo (Fig 4.1) y una curva de histéresis Fuerza Vs. Desplazamiento (Fig 4.2), en donde observamos como se degrada la rigidez del espécimen.



Fig. 4.1

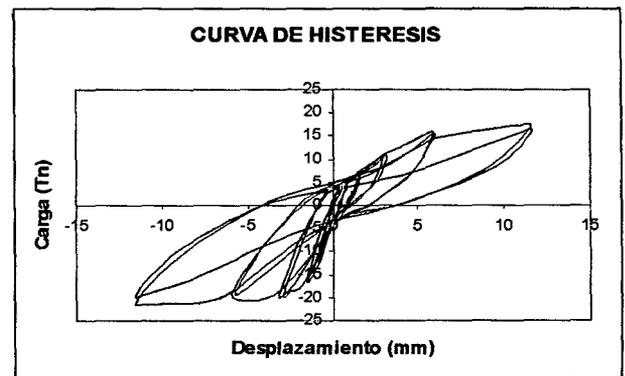


Fig. 4.2

Una vez obtenida la curva de histéresis, procedemos hallar por regresión un modelo trilineal del modelo histerético.

4.1.2 ENSAYOS PSEUDO - DINAMICO

En este tipo de ensayo la ecuación (4.1) se transforma en:

$$[m]\{\ddot{X}_i\} + [c]\{\dot{X}_i\} + \{\bar{F}_i\} = -[m]\{1\}\ddot{X}_{gi} \quad \dots\dots\dots(4.2)$$

Donde, X , m , c , \bar{F} , y \ddot{X}_g es el desplazamiento, masa, la viscosidad, la fuerza de reacción, y la aceleración de tierra; el punto (.), corchetes ([]), y abrazadera ({ }) denotan la diferenciación, matriz y el vector; y " í " indica que las ecuaciones pertenecen al paso i-th. La velocidad y la aceleración son calculadas por las ecuaciones (4.3) y (4.4) que están en función del

desplazamiento del paso medido, el paso anterior y Δt como el intervalo de tiempo de integración para usar la (4.5) del método de la diferencia central:

$$\{X_i\} = \frac{1}{2\Delta t} * (\{X_{i+1}\} - \{X_{i-1}\}) \quad \dots\dots\dots(4.3)$$

$$\{X_i\} = \frac{1}{\Delta t^2} * (\{X_{i+1}\} - 2\{X_i\} + \{X_{i-1}\}) \quad \dots\dots\dots(4.4)$$

Sustituyendo las expresiones anteriores en la (4.2) y reestructurándolo obtenemos:

$$\{X_{i+1}\} = \left([m] + \frac{\Delta t}{2} * [c] \right)^{-1} * \left\{ 2[m]\{X_i\} + \left(\frac{\Delta t}{2} * [c] - [m] \right) * \{X_{i-1}\} - \Delta t^2 * \left(\left\{ \bar{F}_i \right\} + [m] * \{1\} X_{gi} \right) \right\} \quad \dots\dots\dots (4.5)$$

De esta expresión, uno puede encontrar que el desplazamiento se obtiene de la próxima carga (en el paso i+1), sólo se puede estimar por las cantidades conocidas. Aquí, las ecuaciones de movimiento no están en forma incremental, y la iteración puede evitarse.

De este ensayo obtenemos el gráfico del tiempo historia de desplazamiento en función del tiempo (Fig 4.3) y una curva de histerésis Fuerza Vs. Desplazamiento (Fig 4.4).

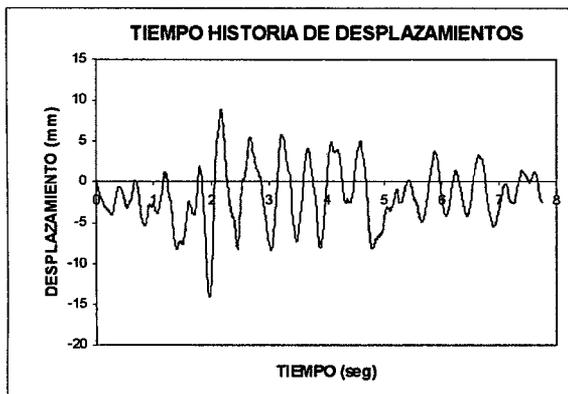


Fig. 4.3

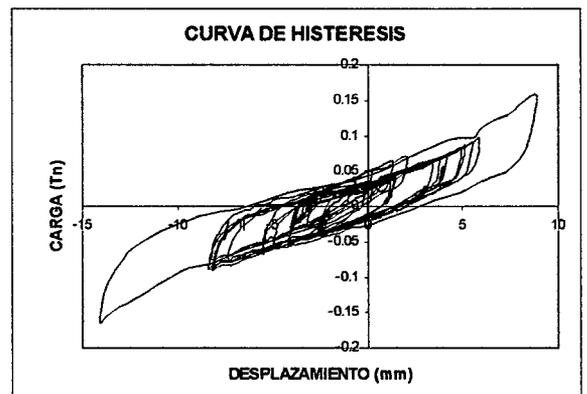


Fig. 4.4

Consideraciones en la Matriz de amortiguamiento

Denominamos amortiguamiento a la capacidad de disipación de energía del sistema, y comúnmente debido a simplicidad matemática, se asume que es de tipo viscoso es decir cuando la fuerza amortiguadora es directamente proporcional a la velocidad de la masa, esto es:

$$F_d = -C * \dot{X}$$

Donde: C= coeficiente de amortiguamiento viscoso.

La capacidad de amortiguamiento no es un valor único, depende de la amplitud de la deformación de la estructura y del nivel de excitación, variando fuertemente según el número de movimientos experimentados por la estructura. No existiendo un método exacto que permita determinar la capacidad de amortiguamiento basado en las propiedades del material y características geométricas de la estructura, en el análisis dinámico se puede adoptar dos formas para desacoplar las ecuaciones de un sistema con amortiguamiento:

Como primera forma el amortiguamiento tipo Rayleigh, donde la matriz de amortiguamiento es expresada proporcional a la matriz de masa y a la matriz de rigidez estructural instantánea, por consiguiente la matriz puede escribirse como:

$$[c] = E_1 * [M] + E_2 * [Ki] \dots\dots\dots(4.6)$$

Donde: [C] = matriz de amortiguamiento

[Mi] = matriz de masa de la estructura

[Ki] = matriz de rigidez global instantánea

E_1 = coeficiente de proporcionalidad de la masa, inversa del tiempo por modelo de Maxwell (1/seg).

E_2 = coeficiente de proporcionalidad de la rigidez, tiempo de retardación por modelo de Voigt (seg).

E_1 y E_2 serán determinados en función de los factores de amortiguamiento para los dos primeros modos (que se suponen conocidos), por tanto las constantes E_1 y E_2 se obtienen de las siguientes relaciones:

$$\phi_1 = \frac{1}{2W_1} (E_1 + E_2W_1^2) \qquad \phi_2 = \frac{1}{2W_2} (E_1 + E_2W_2^2)$$

Donde: ϕ_1 y ϕ_2 : factores de amortiguamiento para los dos primeros modos de vibración. W_1 y W_2 : frecuencia angular del sistema para los dos primeros modos de vibración.

Como segunda forma, la matriz de amortiguamiento es proporcional a la matriz de rigidez elástica, y esto es expresado por la ecuación:

$$[C] = E_2 * [Ke] \dots\dots\dots(4.7)$$

En el presente trabajo utilizaremos la primera forma de amortiguamiento (tipo Rayleigh). Analizando esta expresión, cuando $E_2 = 0$, la matriz de amortiguamiento es proporcional sólo a la masa, el factor de amortiguamiento es pequeño para las frecuencias altas de vibración. Y cuando $E_1 = 0$, la matriz de amortiguamiento sólo es proporcional a la rigidez, el factor de amortiguamiento es mayor para las frecuencias altas. Por consiguiente, la contribución de los modos altos de vibración en la respuesta es menos significativa, lo cual es adecuado para consideraciones del análisis. Será

conveniente entonces hacer $E_1=0$. quedando (4.6) en:

$$[C] = E_2 * [Ki] \dots\dots\dots(4.8)$$

y tomando sólo el primer modo tenemos:

$$\phi_1 = E_2 \frac{W_1^2}{2 * W_1}$$

haciendo : $\phi_1 = \beta$ y $W_1=W$:

$$\beta = E_2 \frac{W}{2} \dots\dots\dots(4.9)$$

o mejor aún:

$$E_2 = 2 * \frac{\beta}{W} \dots\dots\dots(4.10)$$

Es decir conociendo la frecuencia angular del sistema para el primer modo. (frecuencia natural) y dado un factor de amortiguamiento, podemos conocer la “constante” de proporcionalidad de rigidez E_2 , que nos servirá como entrada de dato al programa dinámico a utilizar:

El factor de amortiguamiento β , dependerá del material del sistema y su estado, para el concreto se acostumbra tomar 5% del amortiguamiento crítico, entendiéndose como amortiguamiento crítico la cantidad de amortiguamiento que puede eliminar completamente la vibración. (**Ref. 10**)

La segunda forma para calcular la matriz de amortiguamiento está dada por:

$$[A] = [\Phi]^T [C] [\Phi] = \begin{bmatrix} 2\beta_1\omega_1M_1 & 0 \\ 0 & 2\beta_2\omega_2M_2 \end{bmatrix} \dots\dots(4.11)$$

en la cual las masas modales M_1 y M_2 son iguales a la unidad, si la forma modal $[\Phi]$ ha sido normalizada. Es evidente que la matriz de amortiguamiento $[C]$, puede ser usada postmultiplicando la ecuación 4.11 por la matriz modal inversa, $[\Phi]^{-1}$ y premultiplicando por esta matriz transpuesta, $[\Phi]^{-T}$, esto es,

$$[C] = [\Phi]^{-T} [A] [\Phi]^{-1} \quad \dots (4.12)$$

Consecuentemente, para valores especificados, β_1 y β_2 de razones de amortiguación, la matriz $[A]$ puede ser calculada por la ecuación (4.11) y la matriz de amortiguamiento $[C]$ por la ecuación (4.12). Sin embargo, en la práctica, la inversión de la matriz modal requiere un sustancial esfuerzo de cálculo. En cambio, uso de las propiedades ortogonales de los modos normales, podemos deducir una expresión más conveniente para calcular esa matriz de amortiguamiento del sistema, a saber:

$$[C] = [M] \left(\sum_{n=1}^N \frac{2\beta_n \omega_n}{M_n} \{\Phi\}_n \{\Phi\}_n^T \right) [M] \quad \dots 4.13$$

donde la masa modal $M_n = 1$, cuando los modos han sido normalizados.

La ecuación 4.13, puede obtenerse de la condición de ortogonalidad de los modos normales

$$[I] = [\Phi]^T [M] [\Phi]$$

postmultiplicando por $[\Phi]^{-1}$

$$[\Phi]^{-1} = [\Phi]^T [M]$$

aplicando la operación de matrices transpuestas

$$[\Phi]^{-T} = [M] [\Phi]$$

en donde $[M] = [M]^T$ y sustituyendo en la ecuación (4.12) obtenemos:

$$[C] = [M][\Phi][A][\Phi]^T [M]$$

Después de sustituir la matriz $[A]$, que esta dada por la ecuación (4.11); puede escribirse en la forma expresada por la ecuación (4.13). **(Ref. 8)**

4.2 HISTORIA DEL DESARROLLO DEL ENSAYO PSEUDO – DINÁMICO

El concepto de la prueba on-line se originó en 1969 por Hakuno. Ellos analizaron un sistema de un grado de libertad (un espécimen de cantiliver hecho de acero plano con las dimensiones de 5 mm de espesor, 60 mm de longitud y 50 mm de ancho) usando un actuador electromagnético controlado por una computadora analógica. La ecuación de movimiento del sistema analizado se formuló en la computadora analógica, y la conducta de respuesta elástica e inelástica del sistema bajo una excitación sísmica de carga se investigó en tiempo real. La idea de la simulación de respuesta sísmica sin usar un dispositivo de mesa vibradora, era sumamente informativa, pero la respuesta obtenida era bastante pobre debido a las limitaciones del hardware disponible en ese momento.

En 1974, Takanashi extiende la idea de Hakuno a una forma más realista y práctica. Ellos reemplazaron a la computadora analógica por una computadora digital. De acuerdo con la ecuación de movimiento era discretizar al dominio con respecto del tiempo y la trató como una ecuación diferencial. Con estas modificaciones, la carga aplicada por el actuador no necesita estar en tiempo real, y, de hecho, era necesario usar un proceso repetido de cargar lentamente y hacer una pausa. En la forma original de la prueba on-line desarrollada con una computadora digital, la ecuación diferencial se resolvió usando el método de aceleración lineal. En la prueba on-line de un sistema

inelástico, por consiguiente, la rigidez tangente al sistema era medida y la ecuación de movimiento se formuló en forma incremental. Aunque la prueba tuvo éxito por los sistemas estructurales simples y flexibles, también se descubrieron dificultades en el funcionamiento de la prueba. Es decir, para asegurar una respuesta exacta en la región inelástica, se recomienda iterar la integración en intervalos pequeños del tiempo para la estimación apropiada de la rigidez instantánea. Debido a la limitación de exactitud del desplazamiento que miden los sensores, sin embargo, un incremento pequeño del desplazamiento en cada paso hace a menudo la estimación de la rigidez muy errónea como la división entre cero, particularmente cuando había cambios abruptos en la rigidez.

Para superar estas dificultades en el funcionamiento de la prueba, Tanaka adoptó un nuevo esquema de la integración; en el tiempo, ellos usaron el método de la diferencia central, conocido como una variación explícita del algoritmo de la integración. Aunque menos exacto por el orden de como comparar al método de aceleración lineal, el método de la diferencia central requiere medir la rigidez sin formular la ecuación de movimiento en forma incremental. En cambio las fuerzas de reacción del sistema (medido por la celda de carga) pudo directamente resolver la ecuación de movimiento. El algoritmo básico de la prueba on-line con el método de la diferencia central se muestra en la Fig. 4.5. En esta figura, pueden escribirse las ecuaciones de discretización del movimiento en forma de matriz: (*Ref. 3 – pag. 5*)

Los resultados de un ensayo en línea (sea monótonica, cíclica ó pseudo dinámica) producen respuestas tiempo historia en desplazamientos, fuerza

restauradora, aceleración y velocidad en el modelo a escala natural, subestructura o prototipo.

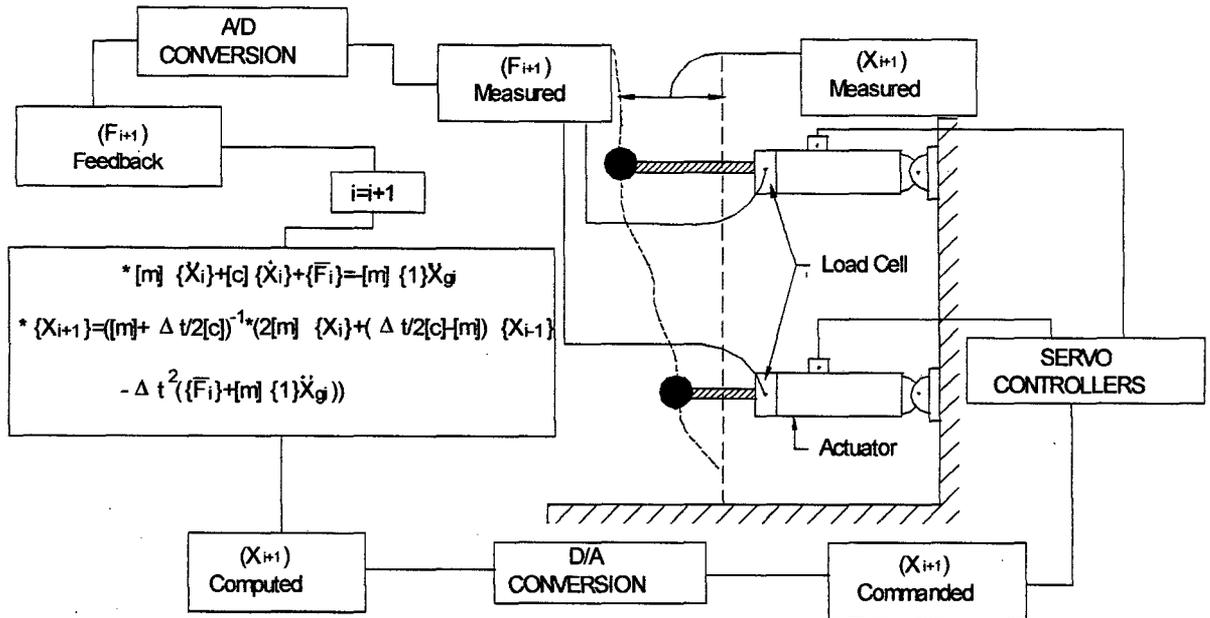


Fig. 4.5 (Algoritmo y procedimiento del Ensayo pseudo Dinámico)

Estos resultados serán utilizados para generar modelos analíticos para el análisis de sistemas estructurales a través de comportamientos inelásticos como se presenta en el anexo 3.

Asimismo, los resultados de un ensayo pueden asemejarse a modelos predefinidos o conocidos como el bilineal, trilineal y otros que se presentan en el anexo 4.

4.3 INSTRUMENTACION Y ADQUISICION DE DATOS

4.3.1 SISTEMA DE CARGA

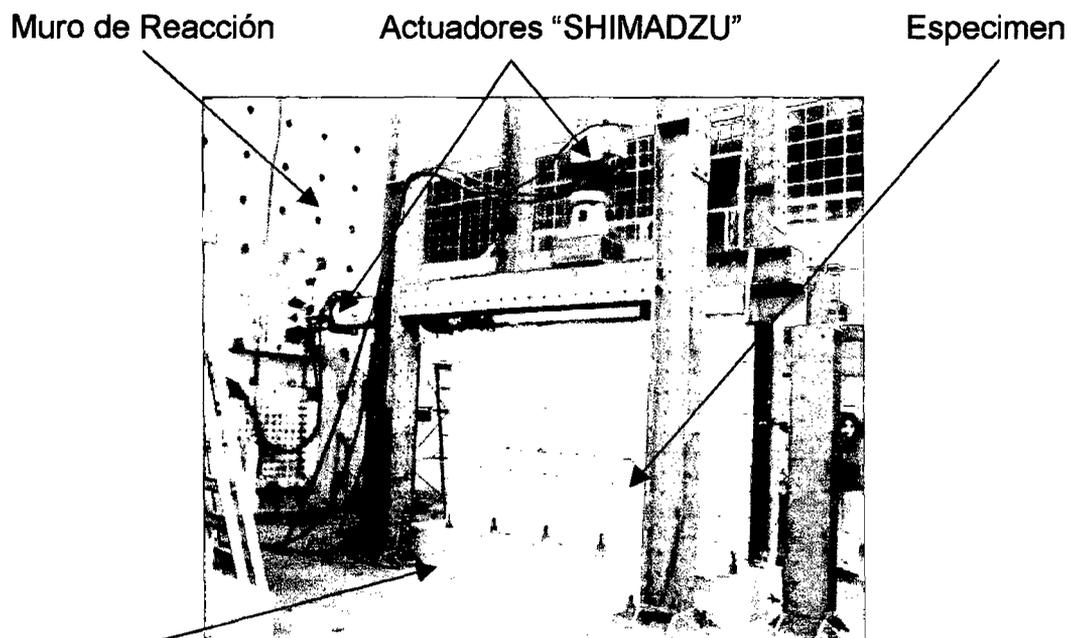
- **La losa de ensayo:** Que sirve de apoyo a la cimentación del espécimen. El laboratorio de estructuras del CISMID cuenta con dicha losa, la cual tiene las siguientes características: es de concreto pretensado, de 11 m de ancho, 22 m de largo y 0.8 m de espesor, tiene conductos verticales de 10 cm de diámetro espaciados cada 60 cm en dos direcciones perpendiculares entre sí. Soporta una carga distribuida de hasta 10 t/m y un momento flector máximo de 15 t-m.
- **El muro de reacción:** Es una estructura de concreto pretensado de 9 m de alto. La sección transversal es de tipo cajón, de 11 m por 4.50 m, con paredes y diafragmas de 0.80 m de espesor, al igual que la losa de ensayo posee conductos que atraviesan el espesor del muro cada 60 cm en dos direcciones. Soporta 450 t por corte y 3300 t-m por flexión.

Los conductos sirven para anclar el marco de aplicación de carga y la base del espécimen a la losa de ensayo y al muro de reacción respectivamente, para ello se usan pernos de alta resistencia ($f_y=8400 \text{ Kg/cm}^2$) que son tensados haciendo uso de gatas hidráulicas.

- **Actuadores "SHIMADZU":** Cuya función es aplicar la fuerza a los especímenes. El Laboratorio de Estructuras del CISMID cuenta con 4 actuadores que tienen una capacidad máxima de 50 t y + - 200 mm de carrera de émbolo.

Cada actuador está equipado con una celda de carga para la medición de la fuerza aplicada y un transductor de desplazamiento interno ("STROKE"), detector que mide el desplazamiento del émbolo del pistón.

Los actuadores van sujetos por un lado al marco de carga y por otro lado al muro de reacción. Poseen rótulas tanto en la base como en el cabezal, con cierta libertad de movimiento o giro en ambos extremos.



Losa de Ensayo

Fig. 4.6 (Sistema De Carga)

- **El panel controlador "SERVO – PULSER"**: Que dirige los movimientos del actuador y la unidad electro - hidráulica, mediante un sistema de realimentación.

Este equipo puede ser controlado por desplazamiento, fuerzas o aceleraciones con rango de desplazamiento desde + 20 mm a + 200 mm y rangos de carga de + 5t a + 50 t, tal como se muestra en la Fig.3.7.

- **La servo válvula:** Es una parte muy importante en el control de la máquina electro – hidráulica de prueba. Es accionada por una señal eléctrica. La válvula del servo permite corregir el flujo de aceite en el sistema para igualar la posición (o la fuerza) en el actuador con el objetivo requerido.
- **La unidad electro - hidráulica:** Cuya función es de impulsar a los actuadores (de acuerdo a la presión indicada por la servo válvula incrementa o disminuye la carga y el aceite necesario entra por una manguera, mientras que el excedente saldrá por la otra). Es capaz de enviar 51 l/min de flujo de aceite a una presión de 210 Kg/cm². Esta unidad está controlada por la servo válvula.

La velocidad máxima del pistón de los actuadores para el equipo del Laboratorio de Estructuras del CISMID es de 2mm/s. (*Ref. 9*)

4.3.2 SISTEMA DE MEDICION

- **Transductores:** Estos son dispositivos que permiten convertir una cantidad mecánica (desplazamiento o deformación, fuerza) en una diferencia de potencial eléctrico.

Los transductores de desplazamiento pueden ser de distinto tipo. La mayor parte son esencialmente transformadores, llamados LVDT (Linear Voltage Displacement Transducer) en los que el voltaje depende de la posición de un núcleo, que se desplaza con el espécimen, en relación a un embobinado, que se fija a un punto de referencia. Para los ensayos se usaron transductores con rangos de ± 5 mm, ± 10 mm, ± 25 mm, ± 50 mm, ± 100 mm y ± 200 mm,

seleccionados según los desplazamientos máximos previstos. En algunos casos se usan transductores provistos de resortes que se instalan de tal modo que siempre estén comprimidos contra el espécimen; en otros casos se usan dispositivos que permiten el libre movimiento del núcleo en uno y otro sentido, como se aprecia en la Fig.4.8.

Las deformaciones unitarias, pueden ser medidas mediante galgas de deformación (Strain Gages). Éstas están constituidas por resistencias que, junto con otras en los dispositivos de acondicionamiento y amplificación de la señal constituyen un “ Puente Wheatstone “. En la condición inicial el puente está “balanceado” teniéndose una diferencia de potencial nula entre dos puntos. Al ocurrir la deformación, las resistencias adheridas al espécimen cambian de valor, desbalanceando el puente, lo que indirectamente permite determinar la deformación unitaria.

- **Las celdas de carga** son dispositivos que miden indirectamente la fuerza aplicada, por medio de la deformación de un elemento de acero apropiadamente calibrado.

- **Equipos de acondicionamiento y amplificación de las señales:**

Estos son necesarios para completar los puentes eléctricos de algunos transductores (por ejemplo, las celdas de carga típicas tienen sólo 2 de las 4 resistencias del puente), para alimentar los circuitos eléctricos, filtrar componentes de alta frecuencia (debidas a “ruidos” mecánicos o a interferencias eléctricas) y para amplificar las señales a niveles tales que

puedan ser leídas o captadas por otros dispositivos, por ejemplo una computadora digital con una tarjeta de adquisición de datos, ver Fig.4.9.

- **Caja de Interface:**

Esta Interface fue diseñada en el CISMID y sirve para conectar las señales de los sensores directamente al computador vía la Tarjeta de adquisición de datos con las conexiones BNC, esta interface puede hacer un muestreo de hasta 32 canales de entrada y mandar señales a los actuadores por 2 canales de salida. (ver Fig.4.10)

- **Computadora para almacenamiento de los datos:**

En los ensayos se usó una micro computadora IBM P-100, en la cual está instalada la tarjeta de adquisición de datos. (ver Fig. 4.11.)

Fig 4.8 Transductor de Desplazamiento.

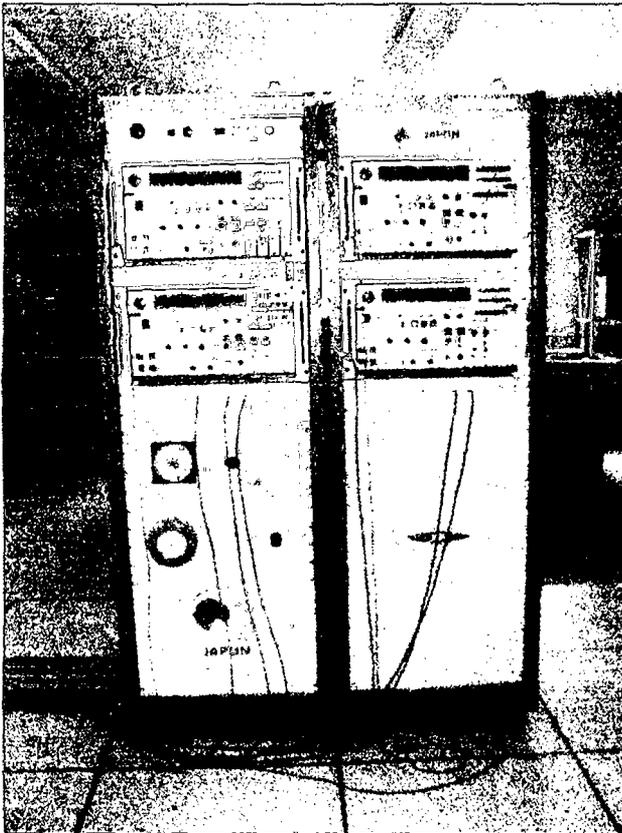
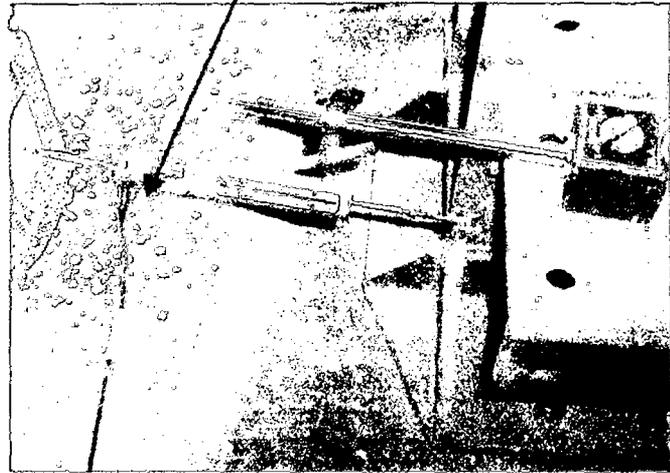


Fig 4.7 El panel controlador "SERVO - PULSER"

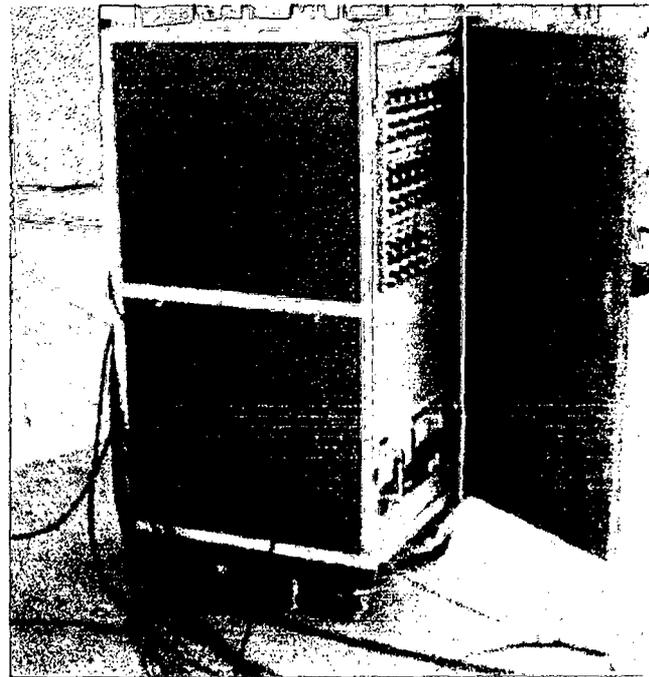


Fig 4.9 Unidad de Adquisición Datos.

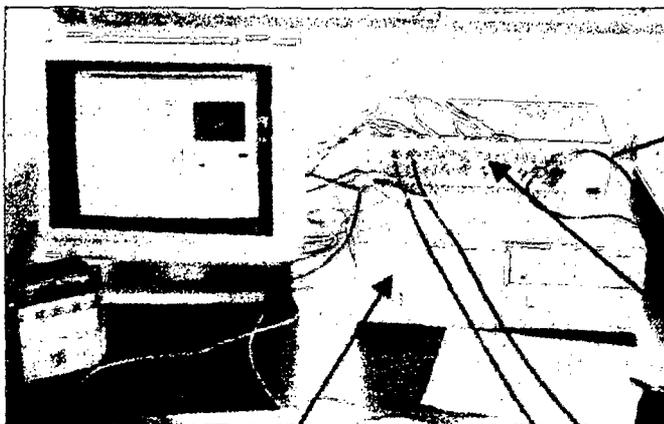


Fig. 4.11 Computadora P-100

Fig. 4.10 Caja De Interface

4.3.3 SISTEMA DE CONTROL

Cuando se tiene un espécimen grande, el nivel de la aplicación de las cargas viene a ser proporcionalmente a su altura, y una gran cantidad de carga, desplazamientos y esfuerzos son adquiridos durante el ensayo. Por otro lado, un mal manejo durante el ensayo de un espécimen a escala natural o a escala grande puede causar un desastre. Bajo estas condiciones, los ensayos a escalas grandes requieren un estricto control de la carga y del procesamiento de datos, así como de una continua verificación de la seguridad. Por lo tanto, para una eficiente ejecución, los ensayos a escala natural o escalas grandes han sido diseñados para ser controlados mediante computadoras, denominándose a este procedimiento ensayos con computadoras en línea. Este sistema de ensayo con computadora en línea está compuesto de una computadora para el servo control, los servo controladores, los actuadores, la unidad de adquisición de datos y una computadora para el procesamiento de datos. Todos estos componentes están conectados de tal manera que constituyen un lazo cerrado.

La computadora para el servo control, tal como su nombre lo indica, sirve para el control de los actuadores.

Un ensayo puede ser ejecutado mediante el control de carga o desplazamiento de los actuadores o por un instrumento externo de medición, escogiendo la opción deseada por medio de esta computadora. La velocidad del pistón de los actuadores también puede ser seleccionada por esta computadora; y si el ensayo exige que más de dos actuadores sean usados, la velocidad de cada actuador puede ser ajustada de tal manera que todos los

actuadores alcancen simultáneamente los valores escogidos de carga o desplazamiento.

La computadora constantemente monitorea las señales de carga y desplazamiento de los actuadores con el objeto de garantizar la seguridad del ensayo. Cuando algunos de los actuadores excede un valor límite predeterminado (superior o inferior), una orden de parada es dada al sistema de carga. La computadora también monitorea la presión hidráulica del aceite, el funcionamiento de las interfaces de control y las servo válvulas, y otros dispositivos. Cuando una señal anormal es detectada, la computadora envía una señal de pausa a los servo controladores.

La computadora del procesamiento de datos está conectada a la unidad de adquisición de datos y a la computadora del servo control. Esta computadora esta compuesta del cerebro principal, del sistema de teclado, una impresora y una pantalla gráfica. La computadora recibe los datos de la unidad de adquisición, los cuales son seleccionados y reducidos mediante un programa de cómputo, y los datos procesados pueden ser enviados a los dispositivos de salida.

Algunas veces, la secuencia de carga del espécimen no es predeterminada; o en otras palabras, las señales de entrada son determinadas basándose en los datos obtenidos en pasos anteriores de la prueba. La computadora del servo control es capaz de recibir los datos de la computadora de procesamiento de datos y crear, mediante un programa de cómputo y en base a estos datos, nuevos valores de entrada. (**Ref. 11**)

CAPITULO V

POSIBLES FUENTES DE ERROR EN EL ENSAYO PSEUDO - DINÁMICO

5.1 FUENTE DE ERROR

La capacidad de la prueba on-line para la simulación de la conducta sísmica en sistemas estructurales, se demuestra con sus ventajas sobre la prueba de mesa vibradora, y sus versátiles aplicaciones a los diversos tipos de problemas estructurales. No hay ninguna duda que la prueba on-line tiene un alto potencial como una herramienta para el estudio de la conducta de respuesta sísmica en sistemas estructurales, pero, al mismo tiempo, uno debe ser consciente que la prueba on-line después de todo no es nada más que un método aproximado. Por consiguiente, la respuesta obtenida no es idéntica a la verdadera respuesta, con el grado de exactitud (o diferencia) dependiendo de la suposición de varias aproximaciones impuesta en la comprobación on-line. En esta situación, uno debe tener pautas cuantitativas acerca de cuánto error podría ser incluido al evaluar los resultados obtenidos de la prueba on-line.

Hay muchas fuentes que pueden traer errores en la respuesta obtenidas en la prueba on-line. Generalmente hablando, las fuentes del error son clasificadas en dos grupos: las fuentes del error intrínsecas y las fuentes del error experimentales.

5.2 CARACTERISTICAS DE LOS ERRORES INTRINSECOS

Las fuentes de error intrínsecas son aquellas incluidas en el curso de formular el algoritmo de la prueba on-line. Algunas de las mayores fuentes de error son:

- 1) La aproximación en el sistema analizado, el cual es continuo, es representada por un sistema discreto de masa-resorte.
- 2) La aproximación de las ecuaciones de movimiento son discretizadas con respecto al dominio de tiempo y resueltas como ecuaciones diferenciales.
- 3) La aproximación que se asume con respecto al amortiguamiento es que este es caracterizado como un amortiguamiento viscoso proporcional a la velocidad.

Si la masa en el sistema analizado tiene naturaleza concéntrica, la representación de la masa discreta debe ser una hipótesis razonable y debe asegurar resultados exactos. En la mayoría de las estructuras construidas se puede considerar que la masa se concentra en cada nivel del piso y puede asignarse una masa concentrada en cada posición del piso que es una opción conveniente. Por otro lado, si la masa es distribuida por la estructura, la representación masa-resorte puede darnos resultados erróneos. Por consiguiente, se recomienda siempre una calibración antes de la prueba. Para este propósito, el análisis numérico elástico, como por ejemplo, el análisis de

elementos finitos, parece ser factible. Pueden hacerse varias corridas numéricas para el sistema analizado con el número de masas como parámetro; los resultados pueden compararse; y finalmente puede juzgarse acerca del hallazgo del número más pequeño de grados de libertad.

En la prueba on-line, los archivos de entrada de la aceleración se digitan con respecto al tiempo, y usando archivos así digitados, el método de la diferencia central se emplea para resolver las ecuaciones de movimiento. En general, se digitan archivos de aceleración analógicos con un intervalo de 0.01 seg. Normalmente se considera que este intervalo es bastante pequeño para incluir todas las componentes de frecuencia que contribuirán en la respuesta del sistema estructural analizado. En la aplicación del método de la diferencia central, la respuesta resultante se desvía más de la verdadera respuesta con el aumento del intervalo de tiempo de integración.

5.3 CARACTERISTICAS DE LOS ERRORES EXPERIMENTALES

Las otras fuentes de error experimental son aquellas que se producen debido a lo imperfecto del equipo experimental:

- 1) El convertidor D/A, hace que el valor del desplazamiento enviado al servo controlador difiera del desplazamiento calculado debido a la resolución finita del convertidor.
- 2) Que el desplazamiento alcanzado después del movimiento del actuador puede ser diferente del valor enviado debido a la precisión finita del sensor de desplazamiento, así como a la limitación del servo control.

- 3) Que el valor de la fuerza medida para un grado de libertad, puede no ser idéntico con la fuerza verdadera en tal grado de libertad, debido a la precisión finita del sensor de medición de carga.
- 4) Que la fuerza medida es cambiada a un valor digital después de la conversión A/D. Estas son las mayores fuentes de errores experimentales incluidas en un lazo cerrado de la operación del ensayo on-line, pero todos los errores acumulados en un lazo son finalmente combinados en un error de la fuerza al final del lazo.
- 5) Existen errores no perceptibles de equipo, que pudieran estar en el sistema eléctrico o el sistema hidráulico, así como el montaje del espécimen, es decir, referentes al montaje; si se da el caso que no se tenga bien empernado los actuadores al muro de reacción y si el espécimen es muy flexible, puede generarse vibraciones que alterarían el funcionamiento normal de los actuadores, y por lo tanto, afectarían las mediciones de desplazamiento a través de los transductores. **(Ref. 1)**

CAPITULO VI

ALGORITMO UTILIZADO EN ENSAYOS EN LINEA:

6.1 ENSAYO DE CARGA LATERAL CÍCLICA

Antes de empezar a ensayar el espécimen es recomendable ubicar e identificar los sensores en un gráfico que represente al espécimen. Luego, de acuerdo a este esquema, se procede a colocarlos en el espécimen y conectarlos a la unidad de adquisición de señales.

El siguiente paso es calibrar los sensores con la unidad de adquisición de datos y con el programa del ensayo cíclico. Para cada sensor hay un registro de salida de los desplazamientos en pantalla que nos permitirá verificar su correcta calibración.

Una vez identificados y calibrados los sensores, se procede a iniciar el ensayo cíclico, para lo cual aparecerá la siguiente ventana tal como se muestra en la Fig.6.1.

En esta ventana ingresaremos:

- El intervalo de tiempo " Δt " que viene a ser el tiempo que demora el actuador en desplazar el embolo.
- El nombre del archivo en donde se guardaran los datos generados por el ensayo.
- El rango de la carga del actuador en toneladas.
- El rango de los transductores en milímetros.
- Una vez ingresado los datos iniciales del ensayo, procedemos a presionar el botón **PROCESAR**, el cual inicialmente leerá todos los canales de los sensores al cual llamaremos **BIAS**, seguidamente manda un voltaje de carga "cero" al actuador.

El siguiente paso será ingresar " Δx " (en milímetros) de desplazamiento hasta llegar al " Δx " que calculamos con el producto de la distorsión y la altura del espécimen, ya sea primero en el sentido empujando como jalando, repitiéndose este proceso dos ciclos para cada distorsión.

El programa automáticamente irá almacenando los datos de desplazamiento de todos los sensores, la carga y el paso en que se realizó la lectura, además ira graficando la curva histerética de cuatro sensores opcionales. El archivo de salida puede ser fácilmente manejable en una hoja de cálculo como EXCEL por ejemplo.

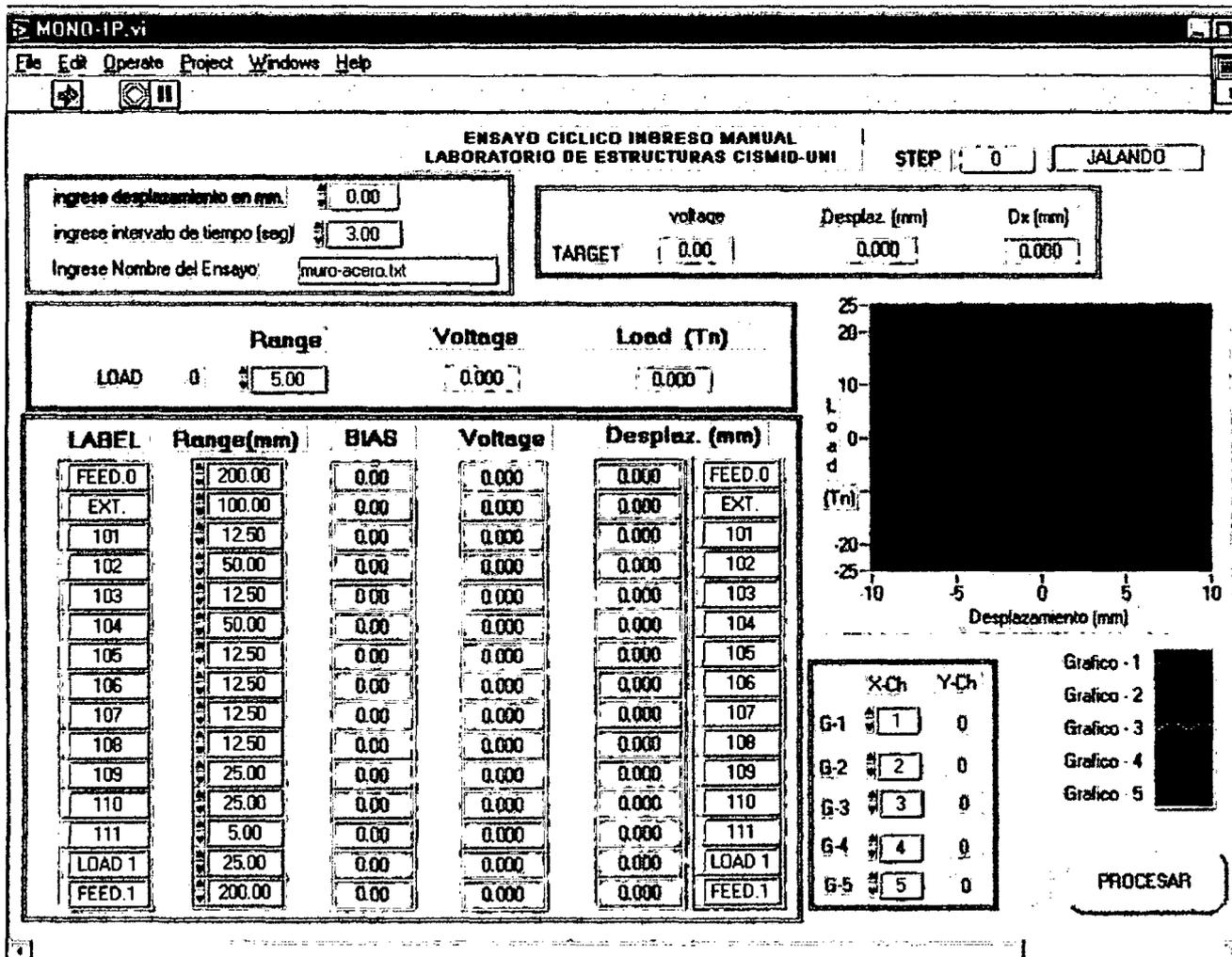


Fig. 6.1

6.1.1 DIAGRAMA DE FLUJO

1

2

3

4

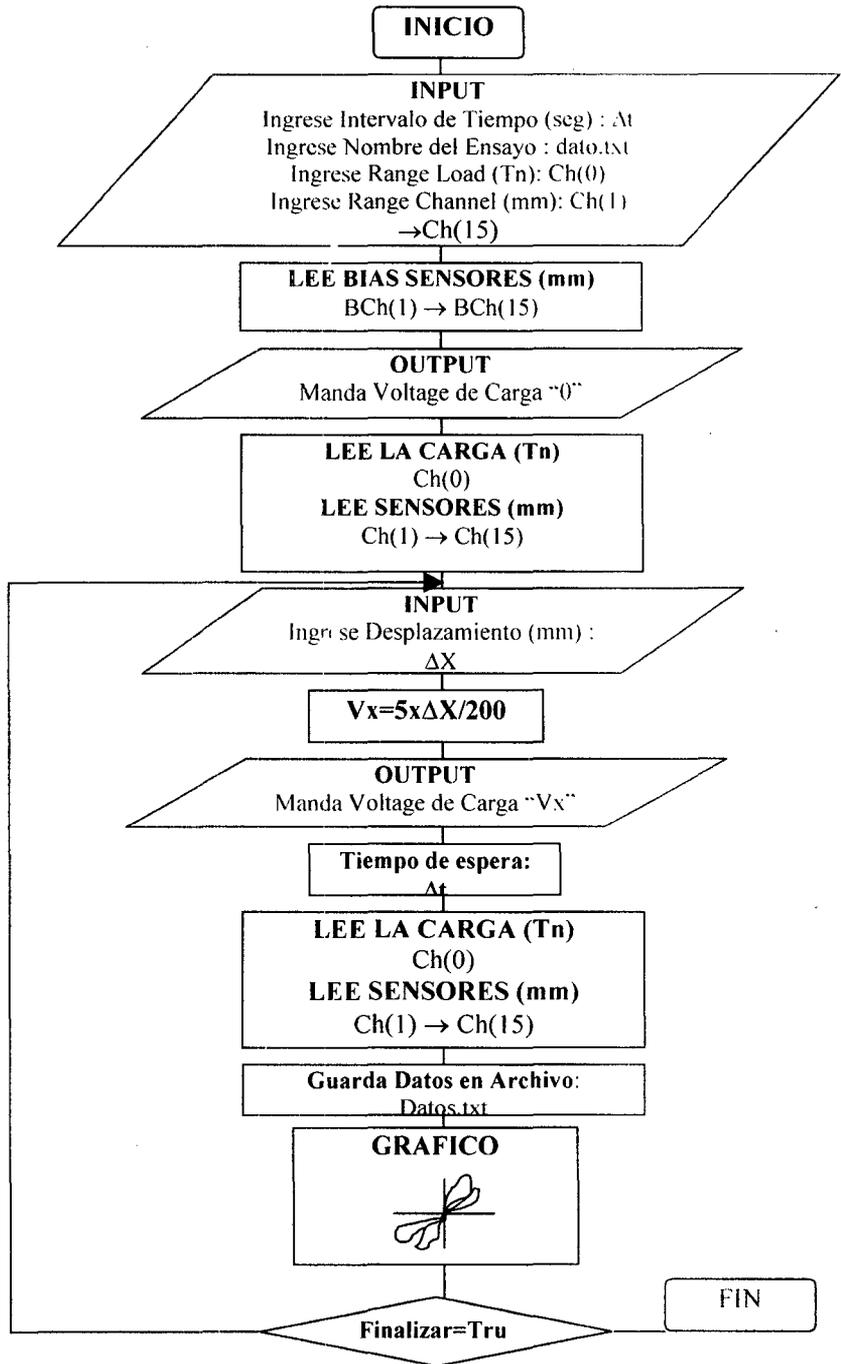
5

6

7

8

9



6.1.2 DESCRIPCIÓN:

1. En este paso ingresamos el nombre del archivo de datos, donde serán guardados los datos generados en dicho ensayo. Además ingresaremos el Δt en segundos que será el tiempo de espera según el cual se dará tiempo al actuador para realizar el desplazamiento del embolo. También proporcionaremos el Range de la carga y de los transductores.
2. En esta secuencia se procederá a leer todos los sensores, esta primera lectura es conocida como BIAS y estará dada en mm.
3. Aquí mandaremos un voltaje de carga "0" al actuador.
4. Procedemos a leer la carga y todos los sensores, donde el desplazamiento real será el desplazamiento leído menos el BIAS.
5. Ingresaremos el desplazamiento " ΔX " en mm, para que se desplace el actuador.
6. Hacemos la conversión, para 5 voltios se desplaza 200 mm el actuador, que " V_x " se necesita para " ΔX ".
7. Mandamos un voltaje de carga " V_x " al actuador.
8. Aquí el sistema espera un " Δt " seg. Donde daremos tiempo al actuador para que la información llegue al servo control y este mande al actuador para que se desplace.
9. Se procede a leer cuanto de carga tenemos y a leer todos los sensores, como ya indicamos inicialmente el desplazamiento real será el desplazamiento leído menos el BIAS.
10. Se procede a guardar los datos obtenidos en el ensayo en el archivo indicado inicialmente.
11. Procedemos a graficar la carga vs. Desplazamiento, en el recuadro de gráfico tiene la opción de hacer 4 gráficos, carga vs. Sensor indicado.

12. Si activamos el botón finalizar, se procederá a finalizar el ensayo, de lo contrario se repetirán desde la secuencia 5.

6.2 ENSAYO PSEUDO DINÁMICO

El procedimiento inicial es el mismo que el explicado anteriormente para el ensayo cíclico, es decir; identificación y colocación de sensores, calibración y verificación.

Una vez ubicados y calibrados los sensores, se procede a iniciar el ensayo Pseudo Dinámico, en el cual nos aparecerá la siguiente ventana tal como se muestra en la Fig.6.2. En esta ventana se mostrara un Menú Principal con tres opciones el cual iremos ingresando en forma secuencial.

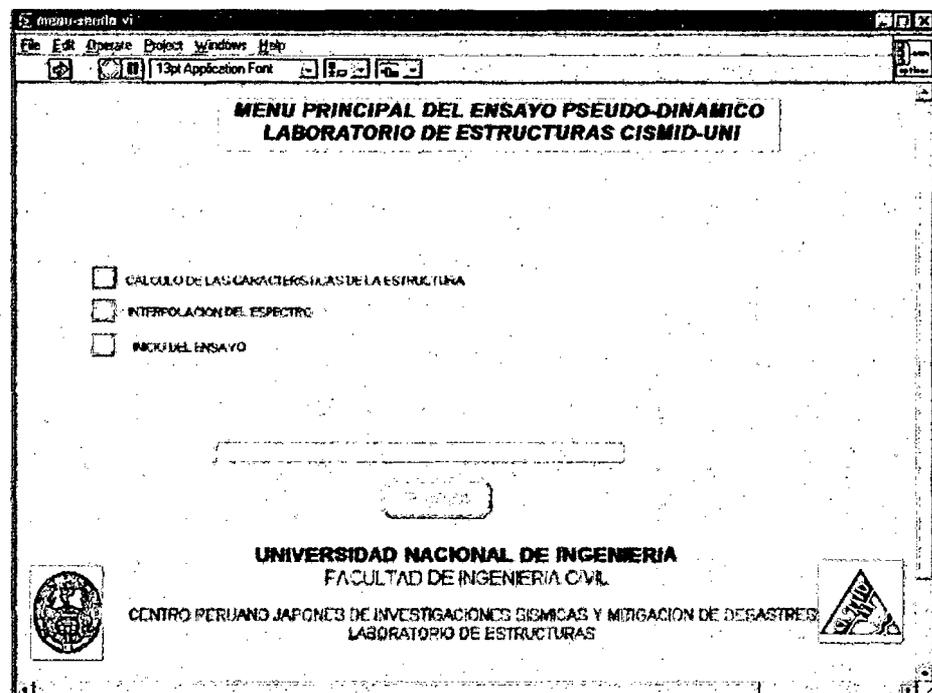


Fig. 6.2

OPCIÓN 1: CÁLCULO DE LAS CARACTERÍSTICAS DE LA MUESTRA (ver Fig.6.3). En esta ventana ingresaremos, el Peso Total de la Estructura (t) y la Rigidez del Espécimen (t/m), el sub programa calculará la frecuencia, periodo y su " Δt " de integración que será aproximadamente " $T/4$ ", finalizará cambiando o dejando el valor calculado, el cual deberá ser menor de **0.01**, para que sea valido el método de la diferencia central.

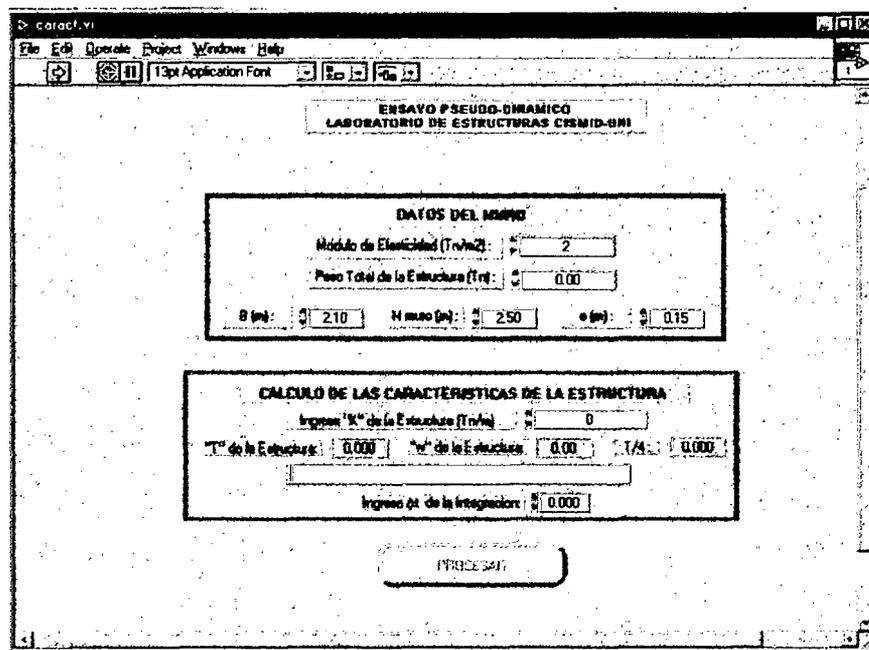


Fig. 6.3

OPCIÓN 2: INTERPOLACIÓN DEL ESPECTRO (ver Fig.6.4).

En esta ventana ingresaremos el nombre del archivo del registro sísmico, el PGA_{max} en Gals, el " Δt " del registro en segundos, el cual fue calculado en la opción 1. El programa procederá a normalizar el registro y finalmente interpolará linealmente el registro, el cual será graficado.

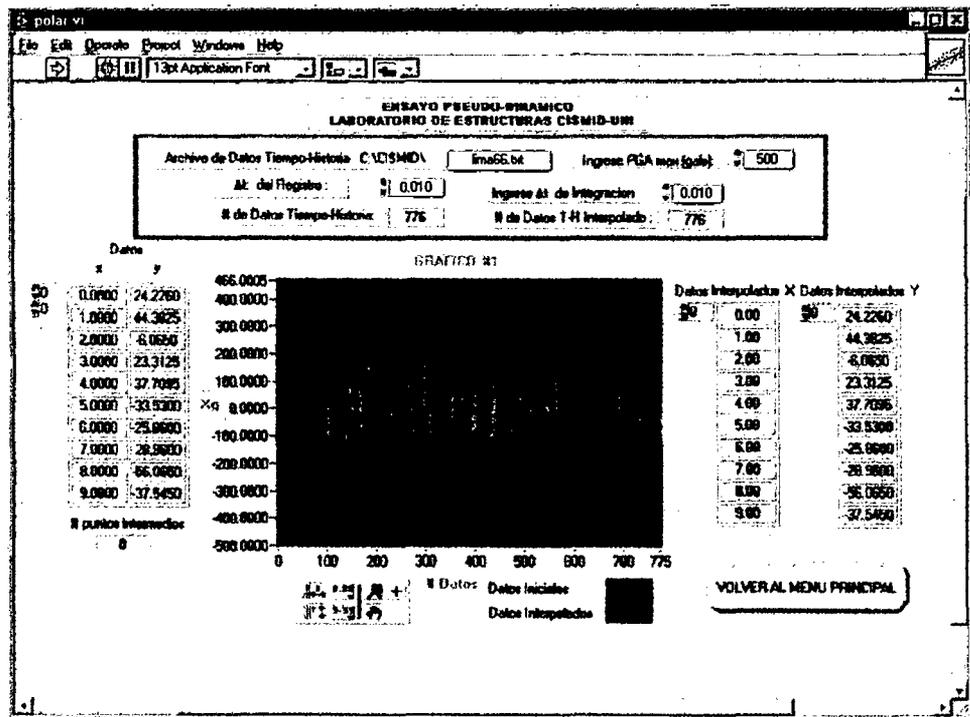


Fig. 6.4

OPCIÓN 3: INICIO DEL ENSAYO: (ver fig 6.5)

En esta última ventana ingresaremos el nombre del Archivo en donde se almacenarán los datos generados por el ensayo, el intervalo de tiempo " Δt " que viene a ser el tiempo que demora el actuador en desplazar el émbolo, el rango de la carga del actuador en toneladas, y el rango de los transductores en milímetros.

Una vez ingresados los datos iniciales, procedemos a presionar el botón procesar, el cual iniciará leyendo todos los canales de los sensores al cual llamaremos "BIAS". Finalmente, ingresaremos dentro de un LOOP que terminará hasta llegar al número de datos del registro sísmico, dentro del cual

irá calculando el desplazamiento que hará el actuador con el algoritmo de la diferencia central.

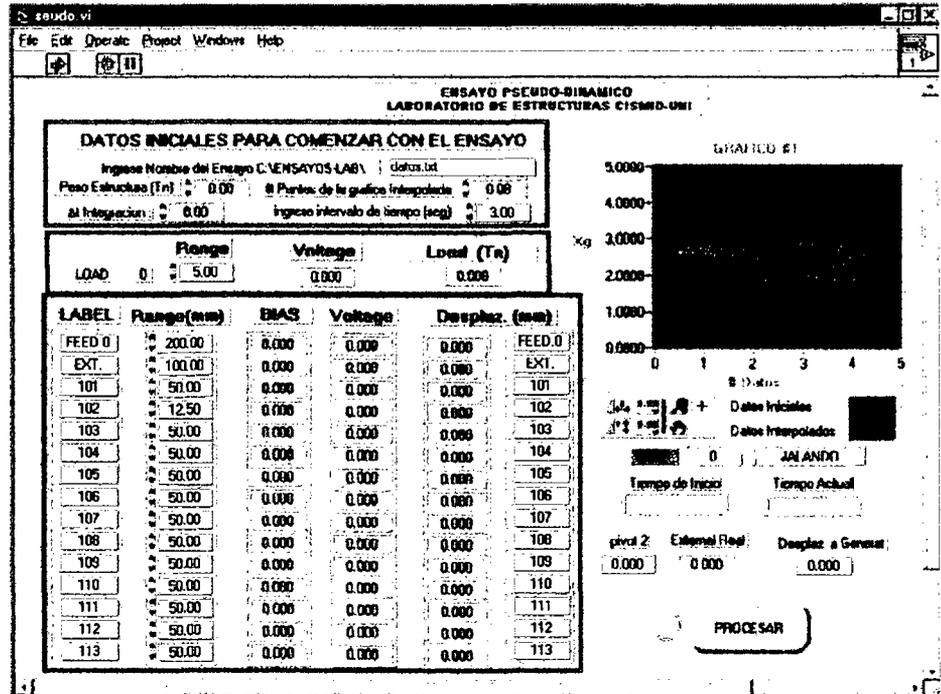
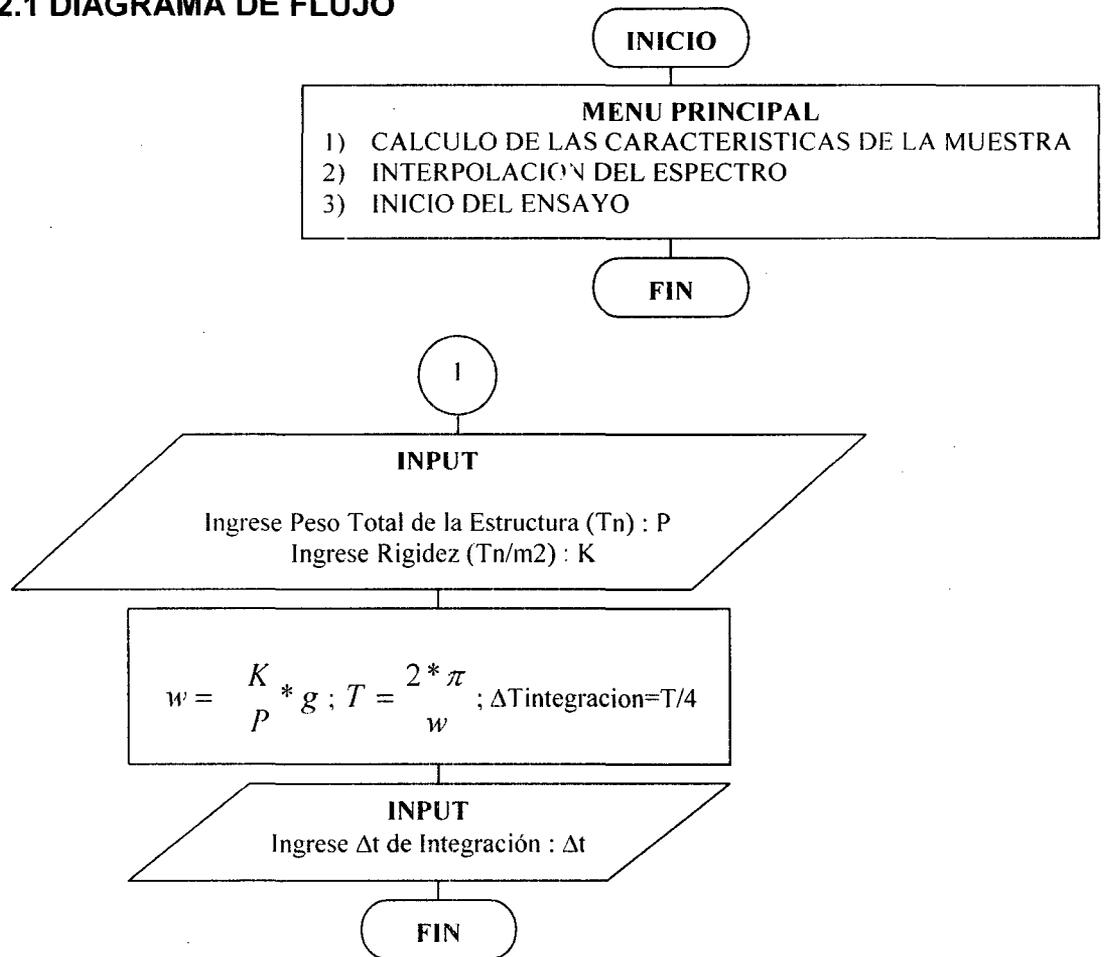


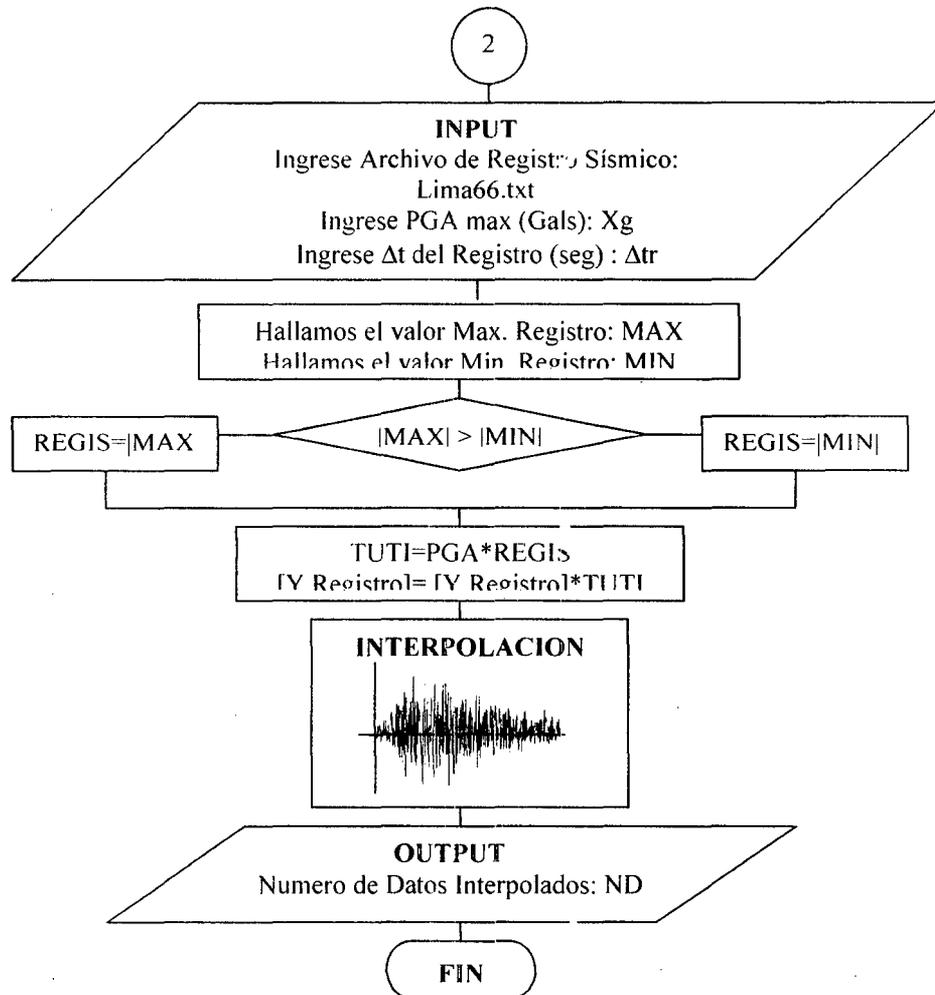
Fig. 6.5

6.2.1 DIAGRAMA DE FLUJO



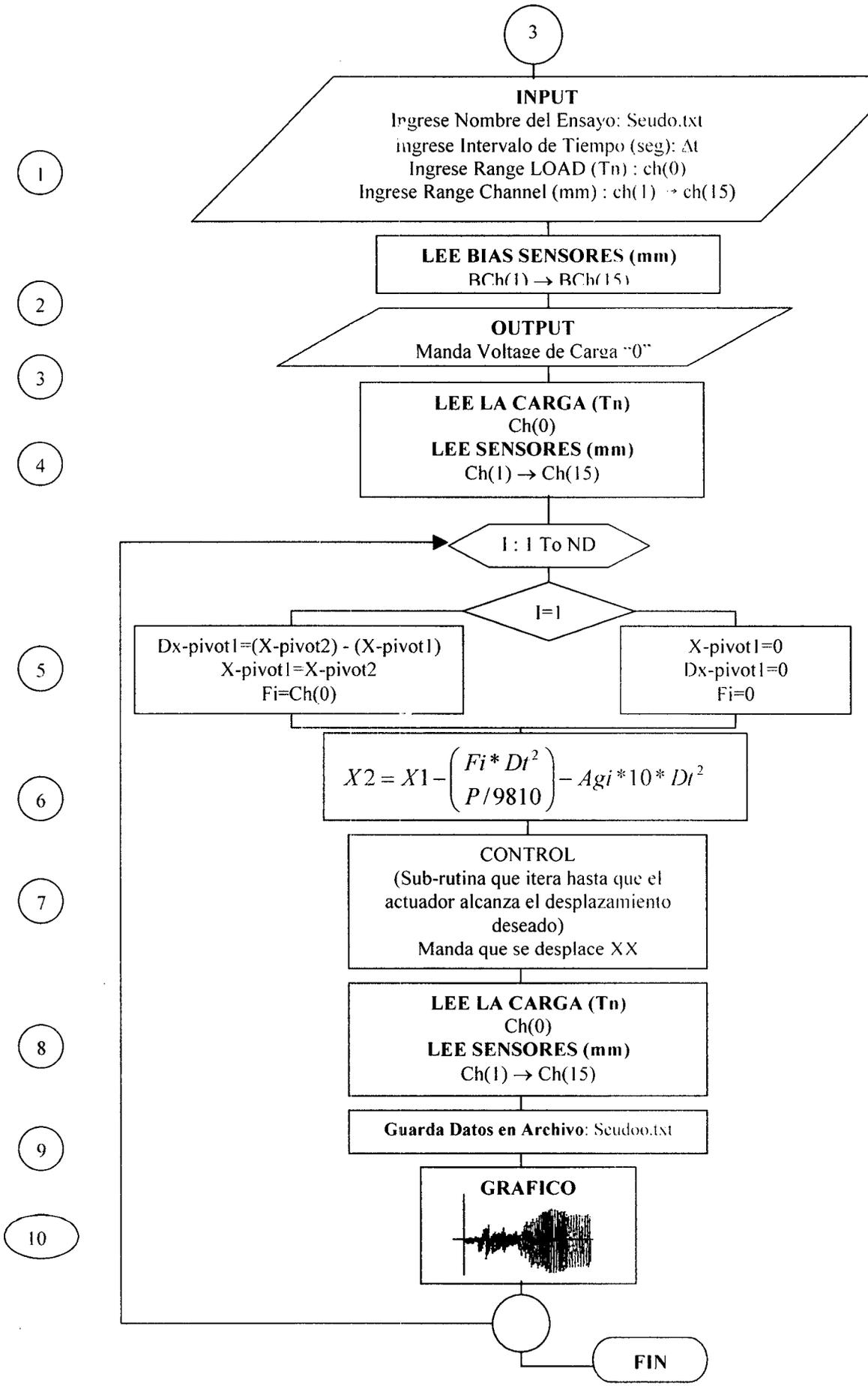
Aquí se presenta el menú principal que consiste de 3 sub-programas:

1. En este sub-programa, se calcularán las características del espécimen.
 - Comenzaremos ingresando el Peso total de la estructura (T) y la Rigidez del espécimen (T/m),
 - Luego, procederá a calcular su frecuencia, su periodo, y su Δt de integración que será aproximadamente $T/4$, finalizará cambiando o dejando el valor calculado que deberá ser menor de 0.01, para que sea valido el método de la diferencia central.



2. En este sub-programa se normalizará el registro sísmico y luego se procederá a la interpolación lineal de dicho registro.

- Comenzará ingresando el nombre del archivo de Registro Sísmico, luego se deberá ingresar el PGA max (Gals), el Δt del Registro (seg) y por ultimo se ingresará el Δt de integración (seg).
- Procederá a normalizar el registro sísmico, calculando el máximo y mínimo valor del registro, luego la variable REGIS tomará el mayor absoluto entre el máximo y mínimo valor y finalmente las aceleraciones del registro serán multiplicadas por el PGA y por REGIS.
- Se procederá a interpolar linealmente el registro sísmico y luego se graficará.
- Obtendrá el número de datos interpolados (ND)
- Finaliza el sub-programa.



1

2

3

4

5

6

7

8

9

10

3. En este sub-programa se procederá a calcular el desplazamiento por el método de la diferencia central.

3.1 Se ingresará el nombre del archivo de datos, donde serán guardados los datos generados en dicho ensayo. Además se ingresará el Δt en segundos que será el tiempo de espera según el cual se dará tiempo al actuador para realizar el desplazamiento del émbolo. También se proporcionará el Range de la carga y de los transductores.

3.2 En esta secuencia se procederá a leer todos los sensores, esta primera lectura es conocida como BIAS y estará dada en mm.

3.3 Aquí se mandará un voltaje de carga "0" al actuador.

3.4 Procederá a leer la carga y todos los sensores, donde el desplazamiento real será el desplazamiento leído menos el BIAS.

3.5 En este paso se ingresará en un FOR de 1 hasta ND.

Si $I=1$, $X\text{-pivot1}=0$, $Dx\text{-pivot1}=0$, $Fi=0$, de lo contrario $Fi=Ch(0)$, $Dx\text{-pivot1}=(X\text{-pivot2}) - (X\text{-pivot1})$, $X\text{-pivot1}=X\text{-pivot2}$.

3.6 Calculará la variación del desplazamiento, luego procederá a calcular el desplazamiento que se moverá el actuador (XX).

3.7 Enviará al sub-programa CONTROL el desplazamiento XX el cual hará uso de un control crítico para que a través de iteraciones sucesivas el actuador llegue al desplazamiento deseado.

3.8 Procederá a leer cuánto de carga tenemos y leerá cada uno de los sensores, como ya indicamos inicialmente el desplazamiento real será el desplazamiento leído menos el BIAS.

3.9 Procederá a guardar los datos obtenidos en el ensayo en el archivo indicado inicialmente.

3.10 Procederá a graficar la curva Desplazamiento vs. Tiempo.

Finalmente, se repetirá esta secuencia hasta que se cumplan "ND" vueltas.

6.3 ALGORITMOS PARA EL CONTROL EXACTO DE LA PRUEBA

Con este nuevo esquema de la prueba on-line, el control para el desplazamiento exacto y medida de fuerza es la llave del éxito para la prueba. Para lograr esto, existen varias técnicas que se han estado incorporando en el sistema de la prueba on-line. Una notable técnica es el uso de transductores de desplazamiento digital. El tipo analógico convencional LVDT normalmente tiene histéresis y ruidos eléctricos. Considerando aquéllos los efectos del error, la exactitud global del analógico LVDT está normalmente en el rango de 0.2 a 0.5 por ciento del rango total. Esto significa que el rango total de los sensores de medición para ser usados en la prueba no pueden ser tan pequeños por lo que pueden producir una resolución relativamente pobre. Por otro lado, en la actualidad, la exactitud que puede lograrse por un transductor de desplazamiento digital es tan pequeña como 0.01 mm, esta exactitud puede permanecer inalterada no importa que tan grande sea el rango total del transductor.

La mayoría de nuestras recientes aplicaciones de carga por actuadores son de tipo hidráulico con un servo control eléctrico, el servo control se establece en forma analógica. Con esta condición, se necesitan que se incorporen técnicas eficaces al transductor de desplazamiento digital en el circuito operacional analógico. Para lograr esto, un algoritmo de control de carga combinado digital-analógico fue desarrollado por Takanashi y después por Okamoto. En este algoritmo, la carga en cada paso es dividida por el incremento de la carga. A cada incremento de carga, el actuador toma su desplazamiento de acuerdo con el algoritmo del funcionamiento analógico.

Después de esta carga, se monitorea el desplazamiento del sistema que fue medido por el transductor de desplazamiento digital, cuando el desplazamiento remanente a ser logrado por el espécimen alcanza al nivel del desplazamiento deseado recién se procesan los datos. Entonces, el próximo incremento de carga se realiza, mientras el incremento del desplazamiento a ser ordenado al algoritmo de control analógico se ajusta de acuerdo con el desplazamiento remanente.

Un ejemplo combinado semejante al control de carga digital-analógico se da en la Fig. 6.6. Supongamos que la estructura de prueba se deforma de la posición X_i a X_{i+1} , primero Δ veces $\Delta X_0 = \Delta (X_{i+1} - X_i)$ del desplazamiento es ordenado para que el actuador se mueva. Aquí, Δ es un coeficiente menor que la unidad (digamos 0.5) y puede especificarse como una entrada inicial por el operador del ensayo. Debido a la rigidez de la estructura y/o la flexibilidad del sistema de carga, el desplazamiento de la estructura después de este movimiento del actuador no es muy probable que sea igual que el desplazamiento del actuador. En este punto, el desplazamiento de la estructura es monitoreado por el transductor del desplazamiento digital, y el desplazamiento remanente es medido. Entonces, Δ veces el desplazamiento remanente se aplica al actuador, y este proceso se repite hasta que el desplazamiento se localiza en X_{i+1} con un error aceptable de ϵ . Este error aceptable, ϵ , también debe especificarse como una entrada inicial, en nuestro caso hemos tomado el valor de 0.01. (**Ref. 3 – pag. 6 -8**)

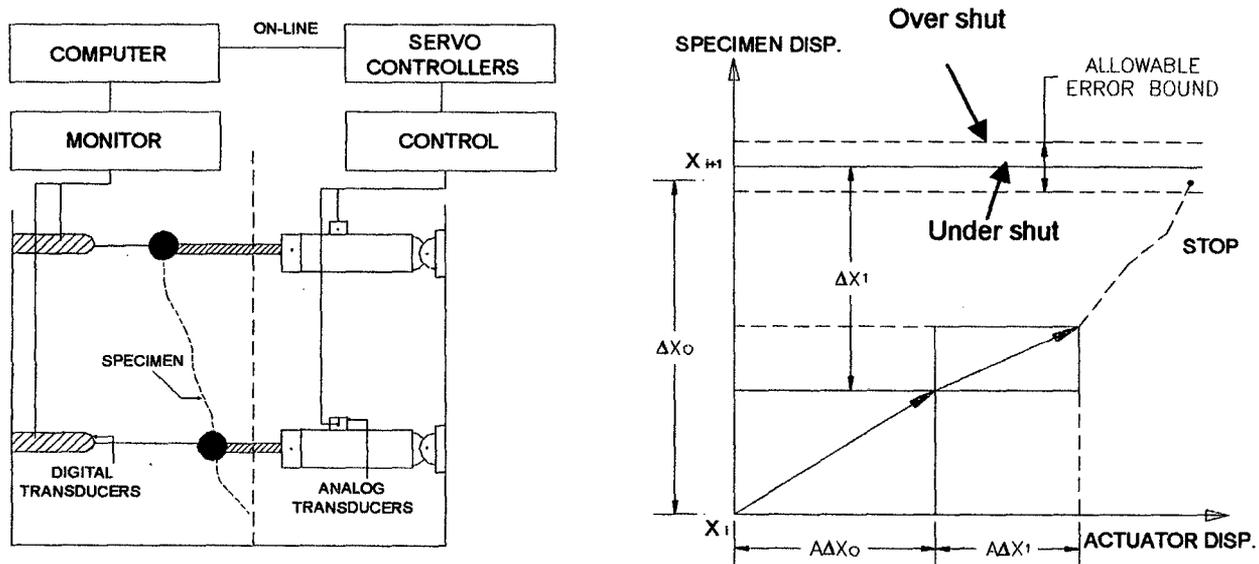
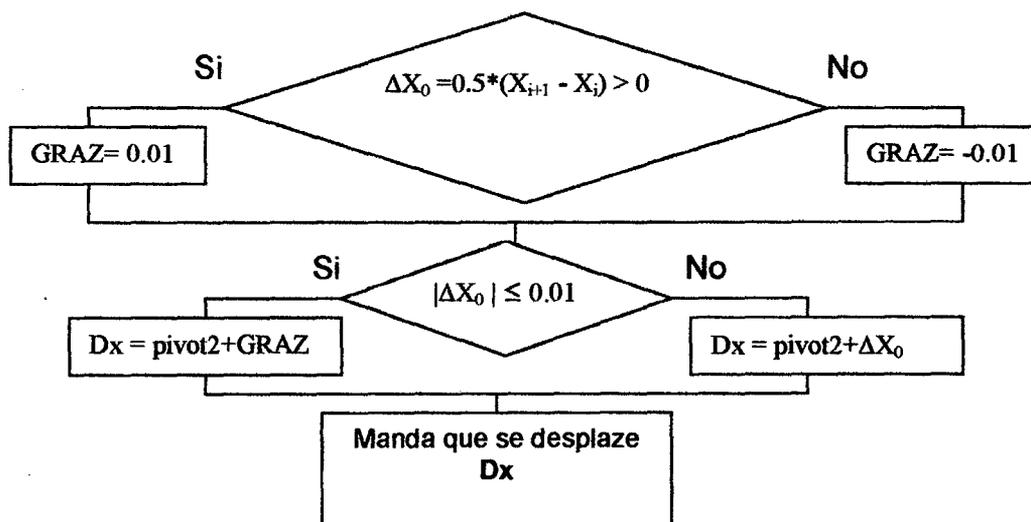


Fig. 6.6 Procedimiento Del Control Del Ensayo On-Line Para La Combinación Digital-Analógico

Zona Over shut: Cuando el error de aproximación ($X_{\text{medido}} - X_{\text{deseado}}$) es menor o igual a ε , es decir el error es por exceso.

Zona Under shut: Cuando el error de aproximación ($X_{\text{deseado}} - X_{\text{medido}}$) es menor o igual a ε , es decir el error es por defecto.

Si $\Delta X_0 = 0.5 \cdot (X_{i+1} - X_i)$ se aproxima a cero, entraremos en un loop de iteración, para salir de este loop usamos el siguiente algoritmo (*Ref. 8*):



Otra forma de control exacto de la prueba es evaluando el signo de la expresión (@) que produce el actuador en la configuración deseada que se ejecuta considerando dos criterios: No se permite la descarga del espécimen y el overshoot del desplazamiento medido es aceptable. Si se cumplen ambos criterio, los desplazamientos target alcanzados sin descargar son confiables. Estos criterios son evaluados con las coordenadas condensadas deseadas, y ejecutando la actualización en la transformación con el continuo muestreo de la medida de signos.

Definamos el vector al cual queremos llegar (TARGET) como Φ_T , al vector medido "MEASURE" como Φ_M y la última posición alcanzada (LAST) como Φ_L (Fig. 6.7). Entonces, para evitar descargar, la posición designada y la última posición alcanzada deben tener el mismo signo. Este signo debe ser el mismo si el signo actual rebasa al desplazamiento deseado. Por consiguiente el criterio de esta combinación se define por:

$$(\{\Delta\Phi_T\} - \{\Delta\Phi_L\}) * (\{\Delta\Phi_M\} - \{\Delta\Phi_T\}) \geq 0 \quad \dots(@)$$

Si la condición no se está satisfaciendo, los signos deben corregirse a través de los incrementos de un dígito hasta que la condición se cumpla. (Ref.8)

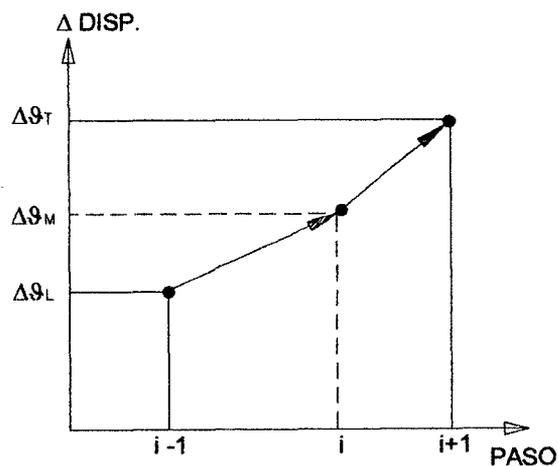


Fig. 6.7

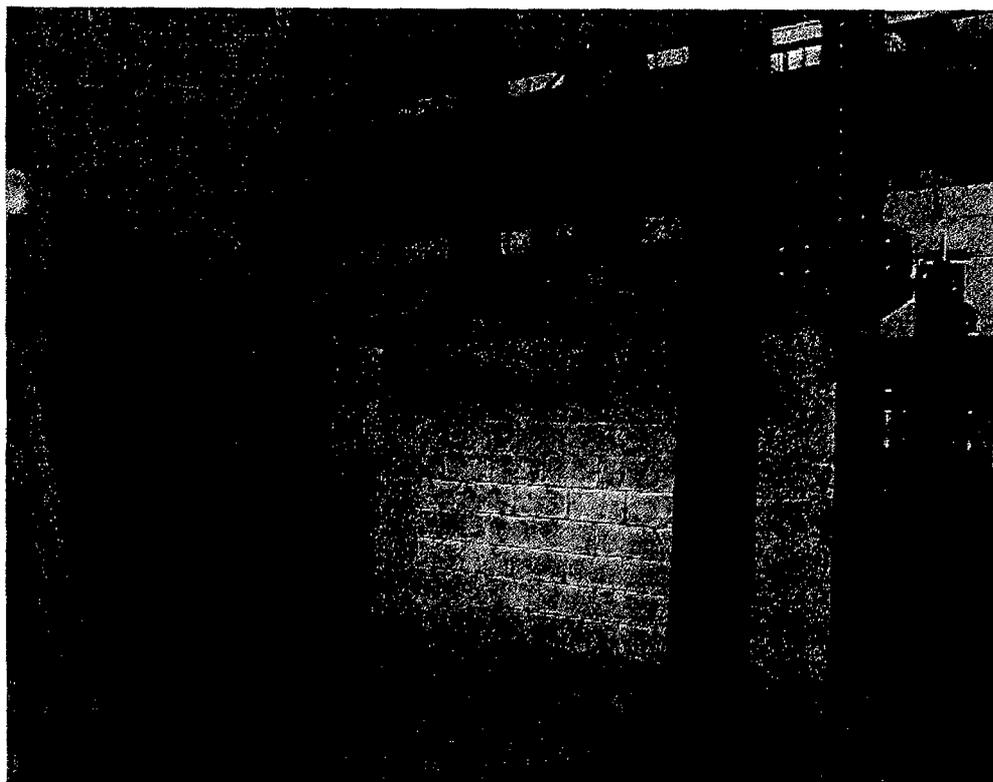
6.4 CONTROL DIGITAL

Hay muchas ventajas para el uso de un sistema de control digital sobre los controladores analógicos convencionales. Una de las principales ventajas es el código de control que fácilmente puede ser usado y modificado simplemente cambiando el programa de cómputo llevado a cabo en el esquema de control digital. Adicionalmente, los esquemas de control digital admiten la adquisición relativamente simple con un alto grado de precisión en la aplicación de un controlador, considerando que los controladores analógicos pueden requerir elaborados circuitos que son demasiado caros para lograr el mismo nivel de precisión para un código de control dado. También, el control digital permite una aplicación más simple del esquema de control no-lineal y se da el lujo de usar la capacidad de decisión en forma lógica dentro del controlador para que puedan incorporarse técnicas de control de fácil supervisión. Tales técnicas permitirán eventos como el monitoreo y el funcionamiento del sistema del control por una computadora utilizando la supervisión y parar el seguro del sistema en caso del funcionamiento del sistema más allá de los límites aceptables de operación. (Ver anexo) (**Ref. 6**)

CAPITULO VII

INTERPRETACIÓN Y PROCESAMIENTO DE DATOS

7.1 ENSAYO DE CARGA LATERAL CÍCLICA



7.1.1 Metodología del Ensayo

El espécimen fue ensayado mediante la aplicación de cargas cuasi - estáticas laterales cíclicas. Todo el ensayo fue controlado por desplazamiento horizontal, de modo que se establecieron seis fases o niveles de distorsión

(1/3200, 1/1600, 1/800, 1/400, 1/200 y 1/100), aplicándose dos ciclos a cada nivel de distorsión o deformación. Esto se puede apreciar en la Fig. 7.1 de la historia de desplazamiento.



Fig. 7.1

Para efectos del presente estudio se definió como distorsión a la relación del desplazamiento horizontal medido en el centro de la viga a la altura del punto de medición tomada desde la base de la cimentación (Fig. 7.2). La carga vertical de confinamiento fue de 9 toneladas, que es equivalente a la carga actuante en un muro similar de un edificio de tres pisos.

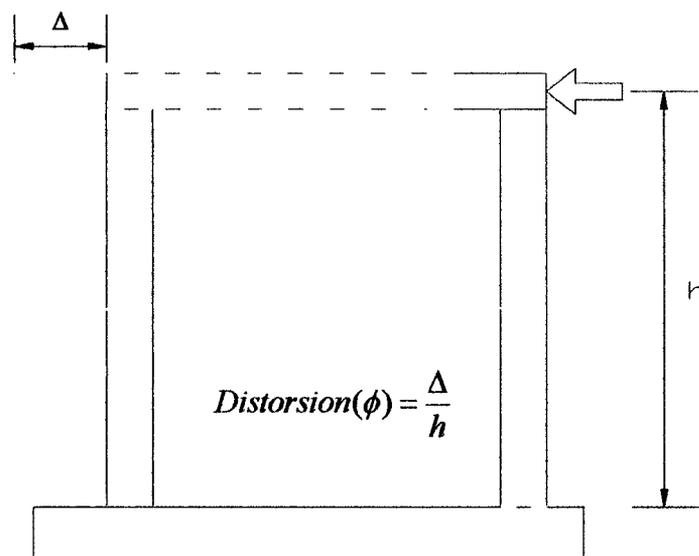


Fig. 7.2

7.1.2 Procesamiento de datos

Los datos almacenados en el computador, en forma detallada son las lecturas paso por paso de la fuerza aplicada en los actuadores con sus respectivos desplazamientos, tal como se muestra en la tabla 7.1.

PASO	LOAD-H	FEED-H	CH-100	CH-101	CH-102	CH-103	CH-104	CH-105	CH-106	CH-107	CH-108	CH-109	CH-110	CH-111	LOAD-V	FEED-V
1	-0.150	0.090	-0.010	0.000	0.010	0.000	-0.010	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	-0.260	0.120
2	0.070	0.090	-0.110	0.040	-0.030	0.000	0.000	0.000	-0.010	0.050	0.000	0.020	-0.040	0.000	-8.990	-3.790
3	-2.490	-0.400	0.070	0.150	0.110	0.010	0.000	0.010	-0.010	0.070	0.020	0.020	-0.040	0.000	-8.990	-3.790
4	-6.070	-0.890	0.330	0.340	0.220	-0.020	-0.040	0.020	0.000	0.110	0.030	-0.120	-0.020	-0.010	-8.980	-3.690
5	-9.560	-1.370	0.660	0.520	0.360	-0.030	-0.080	0.040	0.010	0.120	0.030	-0.210	0.020	-0.010	-8.990	-3.880
6	-11.250	-1.570	0.800	0.560	0.460	-0.040	-0.110	0.050	0.030	0.130	0.030	-0.270	0.050	-0.020	-8.990	-3.490
7	-8.380	-1.370	0.660	0.480	0.320	-0.040	-0.110	0.040	0.030	0.130	0.030	-0.270	0.070	-0.020	-9.000	-3.880
8	-3.990	-0.890	0.370	0.330	0.110	-0.040	-0.040	0.030	0.020	0.120	0.040	-0.270	0.050	-0.010	-8.990	-4.370
9	-0.790	-0.400	0.070	0.190	0.040	-0.040	0.000	0.020	0.010	0.090	0.040	-0.180	0.000	0.000	-8.990	-3.980
10	0.530	0.090	-0.040	0.080	-0.020	-0.030	-0.010	0.010	0.010	0.080	0.040	-0.070	-0.040	0.000	-8.990	-3.980

Tabla 7.1

Tales datos son almacenados en un archivo ASCII, los cuales pueden ser importados por una hoja de cálculo para su procesamiento. Los transductores LVDT distribuidos en todo el espécimen son enumerados desde el "100" hasta el "111", tal como se muestra en la fig. 7.3

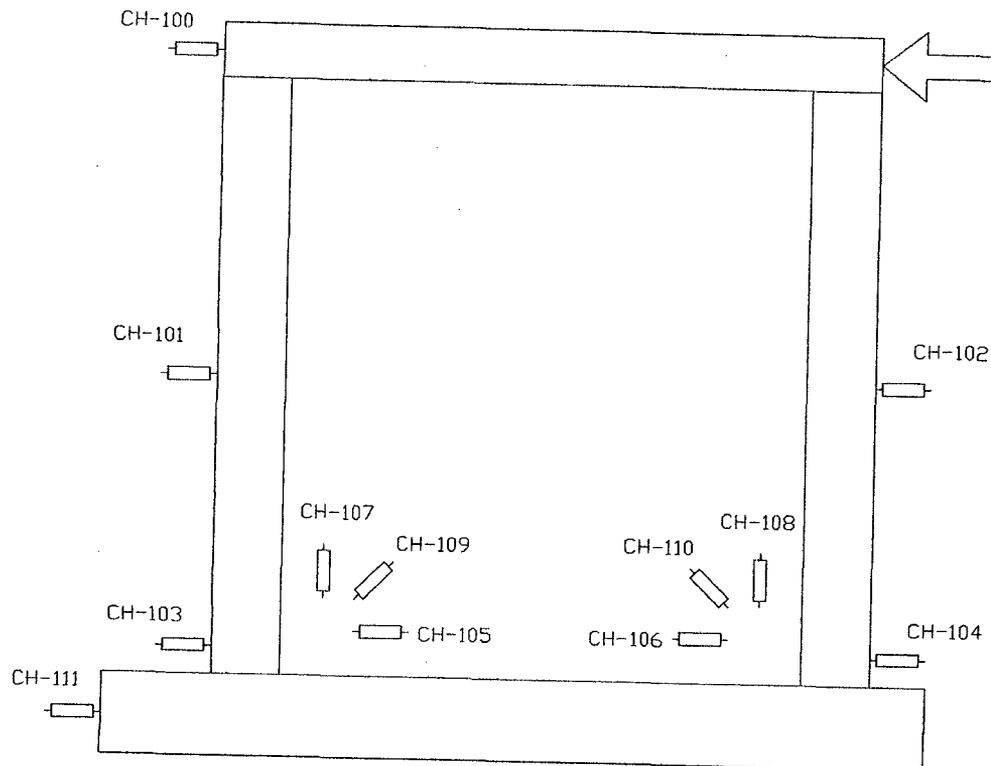


Fig. 7.3 Ubicación De Los Sensores En El Muro

Curva Histerética.- Representa el comportamiento dúctil de un espécimen en la que nos indica una degradación de su resistencia con el incremento del desplazamiento o con los ciclos sucesivos, El área que encierra los ciclos es una medida de la energía que puede ser disipada. Se observó el transductor "111" que daba el desplazamiento en la base, que restado con el transductor "100" da el real desplazamiento. Se procedió a graficar la aplicación de la carga registrada paso a paso vs. el desplazamiento real. Con este ploteo de puntos se obtuvo la roseta o curva histerética del espécimen.

Luego del listado original se comenzó a diferenciar los niveles de deformación de acuerdo al control manual que se realizaba.

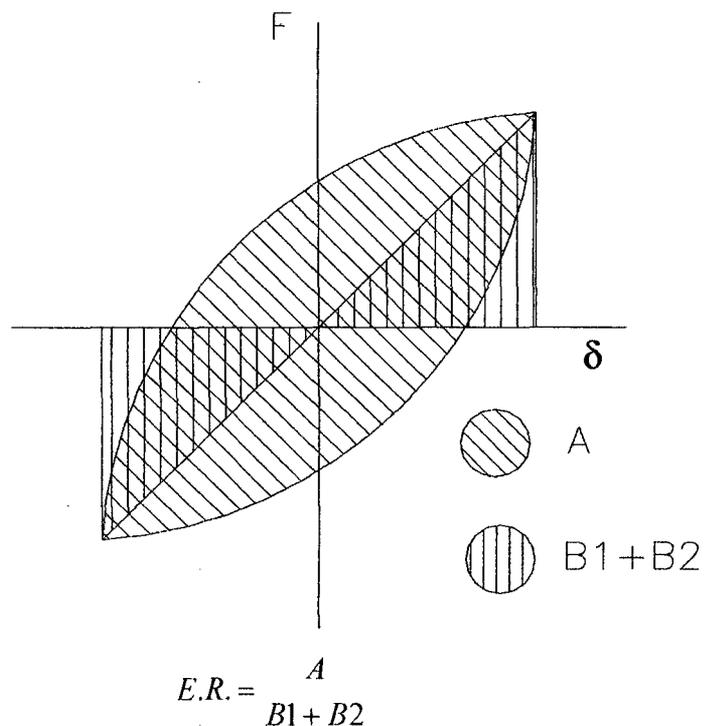
Curva Envolvente.- Una vez diferenciados todos los niveles de deformación se procedió a hallar todos los puntos donde se obtuvieron la fuerza máxima por un lado y la deformación máxima por el otro, tanto cuando el actuador tracciona como cuando comprime, estos puntos fueron ploteados encontrándose una curva que da la fuerza aplicada vs. la deformación.

Degradación de la Rigidez.- Se ha tomado lo que se llama rigidez pico a pico, es decir de un lazo histerético se ha tomado los dos puntos extremos de deformación máxima, estos puntos se unen imaginariamente formando una recta cuya pendiente es la rigidez que se presenta, este proceso se hace para cada lazo y para un mismo nivel de deformación se usa el promedio de las dos pendientes obtenidas en cada lazo.

Disipación de Energía.- Para obtener la energía que se disipa es necesario obtener el área encerrada por las curvas. Primero se obtiene el área que absorbe el muro cuando es cargado, posteriormente al descargarse el muro y recuperar su capacidad se obtiene el área de la curva de degradación.

Si no hubiera disipación de energía las curvas de carga y descarga serían iguales. El área encerrada entre la curva de carga y descarga corresponde a la energía que se ha disipado durante el lazo o ciclo ejecutado.

La energía relativa es la relación de la energía disipada respecto a la energía absorbida por un sistema elástico de rigidez equivalente.



El amortiguamiento viscoso equivalente (b) es hallado a partir de la energía relativa. (**Ref. 11**)

$$b = E.R. / 2\pi$$

7.1.3 Interpretación de Resultados:

Comportamiento Histérico.- Los lazos histeréticos mostrados en la gráfica son característicos de los muros de albañilería de bloques de concreto armado.

Los lazos de los primeros niveles de deformación, en la etapa anterior al primer agrietamiento diagonal (1/3200 y 1/1600) mostró un comportamiento elástico lineal, en este rango se puede describir la curva fuerza lateral vs. Deformación del muro a través de una ecuación lineal (Fig 7.4). En el nivel 1/1600 se notó un pequeño ensanchamiento de los lazos histeréticos que reflejan la formación de las primeras grietas. (Fig. 7.5)

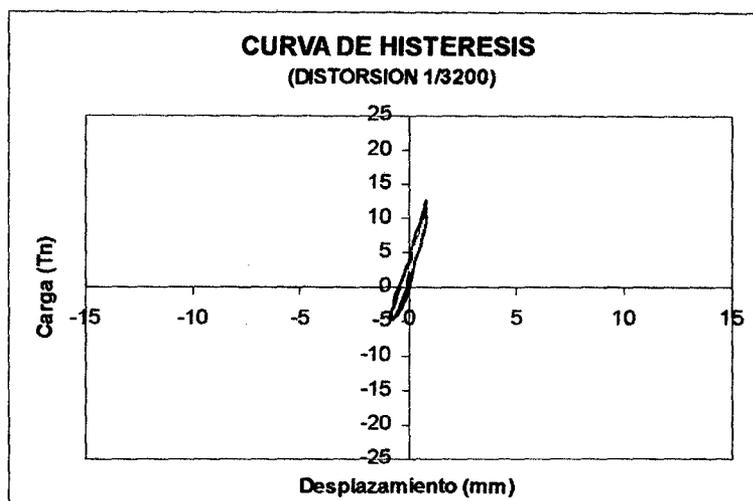


Fig. 7.4

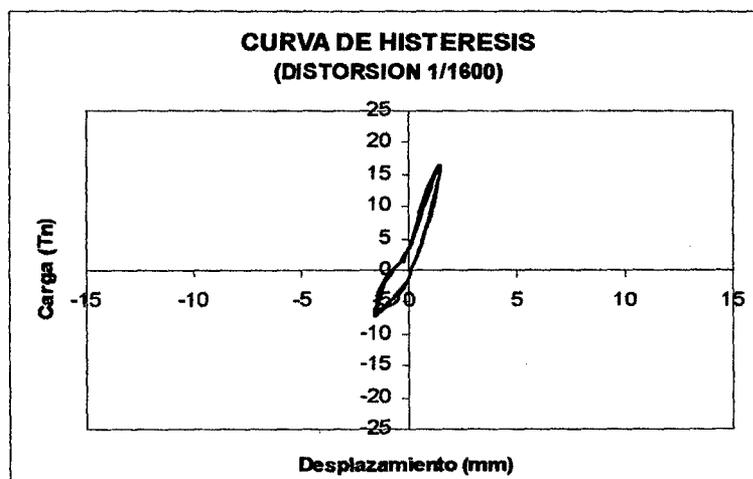


Fig. 7.5

En el nivel 1/800 el lazo experimenta un ensanchamiento mayor, esto indica la disipación de energía que se da a través del agrietamiento principal por flexión, que también significó degradación de rigidez (Fig 7.6). Tal como se mencionó anteriormente, para cada nivel de distorsión se aplicaron dos ciclos o lazos; por lo general aunque son muy similares, en el nivel de distorsión 1/400 el segundo lazo degradado respecto al primero (Fig 7.7). Después del primer agrietamiento, el comportamiento del muro pasa a una etapa no lineal e inelástica, el ensanchamiento de los lazos es cada vez mayor, es decir el área contenida en cada ciclo y por lo tanto la energía disipada es creciente, también continua la degradación de la rigidez.

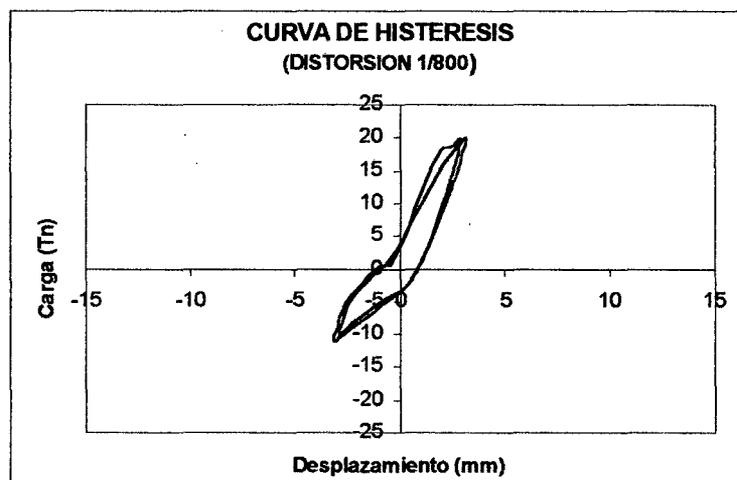


Fig. 7.6

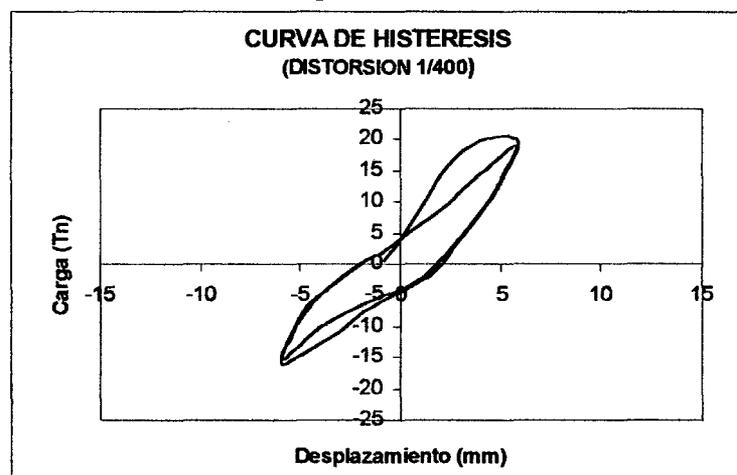


Fig. 7.7

Si bien mantiene su capacidad resistente (aún a costa de la pérdida de rigidez) ésta es solo hasta el nivel donde se produce la diagonal principal, después de lo cual dicha capacidad disminuye drásticamente.

En la distorsión 1/200 se alcanza el máximo valor de la fuerza lateral resistida. En los lazos correspondientes a nivel 1/200 se nota una característica particular en la forma del lazo. Al ir descargando el actuador (después de la aplicación de una carga) el muro tiene una cierta rigidez que es la pendiente de la curva. Cuando se continúa y se carga, ahora en el otro sentido, esta curva varía, aumenta, lo cual indica una recuperación de dicha rigidez. Este fenómeno es conocido como el efecto "Pinching" y se manifiesta después del agrietamiento. En esta etapa, los lazos si bien son anchos en sus extremos, en la parte central, hacia el origen tienden a estrecharse. Esta aparente recuperación de la rigidez es atribuida al reacomodo de las partículas, esto es, al invertir el sentido de la carga, la grieta se cierra y su reacomodo significa un aporte provisional de rigidez al muro. Esta forma de los lazos es típica de estructuras en que predomina la deformación por corte (Fig. 7.8).

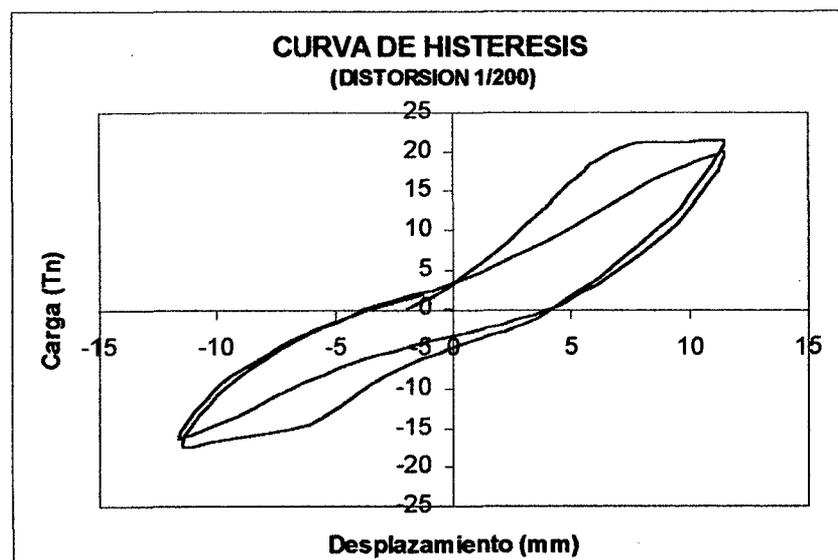


Fig. 7.8

Curva envolvente.- Se presenta la curva envolvente fuerza lateral vs. desplazamiento en la Fig. 7.9 respectiva. El comportamiento fue similar para la rama positiva (fuerza positiva, actuador traccionando) como la negativa (fuerza negativa actuador comprimiendo), aunque esta última presentó valores de fuerza máximos ligeramente menores. Esto posiblemente se deba al sistema de transmisión de carga del muro.

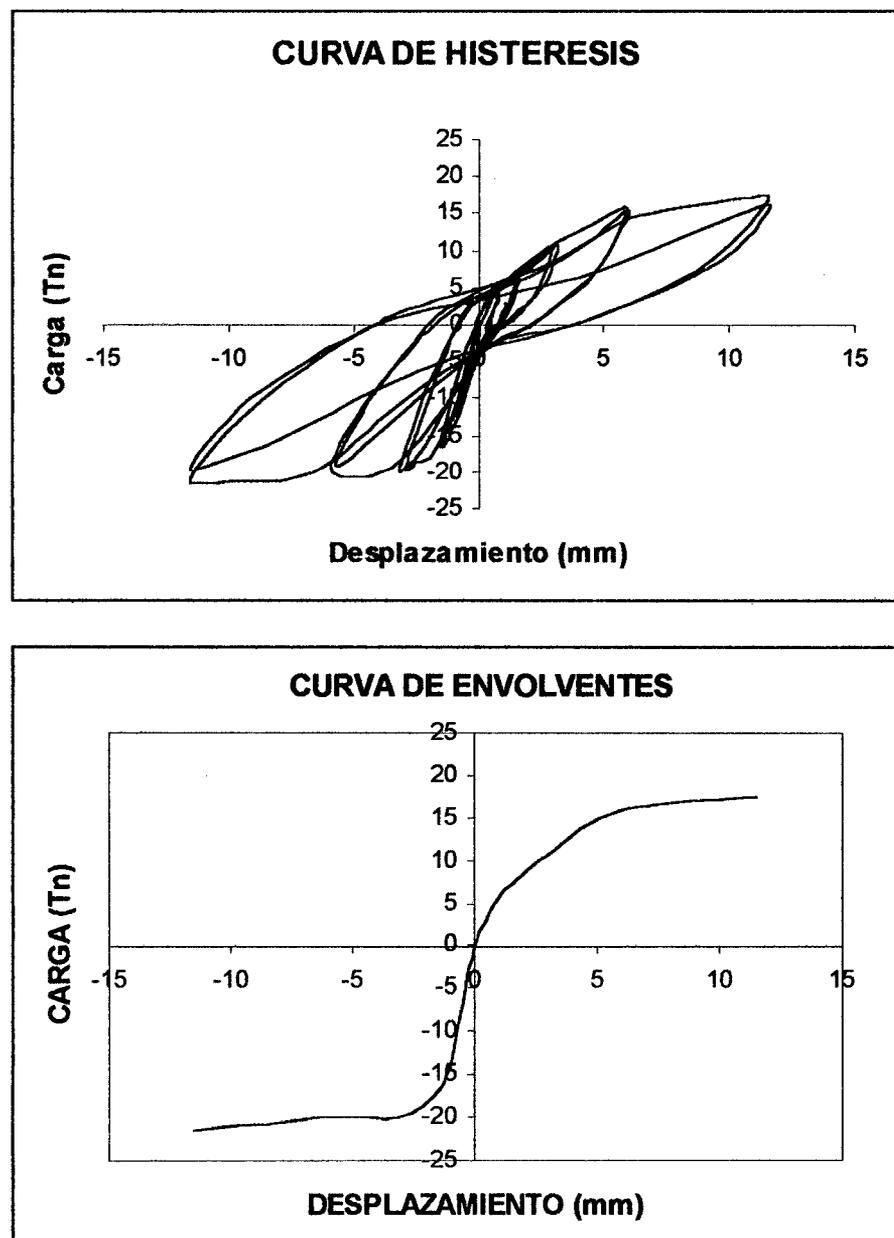


Fig. 7.9

Para el comportamiento inicial del muro, esto es, para el tramo elástico lineal se efectuó una regresión lineal con los datos obtenidos en el experimento para los cuatro primeros ciclos (correspondiente a los niveles de deformación 1/3200 y 1/1600) que indica una rigidez de 9.58 tn/mm.

En esta etapa elástica se alcanzó una fuerza lateral promedio de 16.6tn para la distorsión 1/1600. Después de esto se inició una etapa no lineal e inelástica coincidente con la deformación de la primera grieta diagonal. Sin embargo el espécimen resistió mayores fuerzas laterales lo que indica una reserva de capacidad en el muro mas allá de este punto, hasta la deformación completa de las diagonales principales en forma de X.

La resistencia máxima del espécimen, por lo tanto se da para el rango inelástico, más específicamente para una distorsión de 1/200 y alcanza un valor de 17.45 a 21.51 tn. (traccionando y comprimiendo respectivamente). Después de producido el agrietamiento diagonal principal, la curva decae notoriamente.

Resumiendo, distinguimos tres etapas definidas en el recorrido de la envolvente: una etapa elástica lineal que corresponde a distorsiones bajas de hasta 1/1600, en el que no obstante la formación de grietas por flexión se puede decir que mantiene su condición de linealidad.

El primer agrietamiento diagonal marca el inicio de una etapa inelástica no lineal hasta alcanzar su máxima resistencia lo cual ocurre para 1/200. Esto

se puede observar también por el ensanchamiento de los lazos y por el cambio de pendiente en la curva histerética.

Después de alcanzar su punto máximo, el espécimen sumamente deteriorado mantiene su capacidad de deformación pero con una gran pérdida de rigidez, demostrando ser un elemento estructural con gran ductilidad.

Degradación de rigidez.- Se presenta en la gráfica la curva Rigidez VS. Distorsión (Fig. 7.10), la cual nos muestra la degradación de la rigidez a partir de la rigidez inicial de 10.09 t/mm.

En los primeros niveles de deformación se nota un fuerte deterioro de la rigidez quedándose con solo 16.12% de la inicial que equivale a 1.63 t/mm (Tabla 7.2).

$\theta = \delta/h$ Distorsión Nivel de deformación	d Despl. Nom. (mm)	Fuerza (t) Máxima		Deformación máxima (mm)		Rigidez pico a pico		
		Compresión (-)	Tracción (+)	Compresión (-)	Tracción (+)	Rigidez	Rigidez promedio	%
1/3200	0.75	11.25	4.85	0.85	0.81	9.70	10.09	100.00
1/3200	0.75	12.55	4.86	0.85	0.81	10.49		
1/1600	1.50	16.60	7.10	1.47	1.64	7.62	7.70	76.32
1/1600	1.50	16.37	6.44	1.44	1.49	7.78		
1/800	3.00	19.83	10.39	2.93	2.88	5.20	5.05	50.04
1/800	3.00	19.88	10.89	3.15	3.13	4.90		
1/400	6.00	19.57	15.84	5.89	5.94	2.99	2.96	29.33
1/400	6.00	19.06	15.30	5.76	5.98	2.93		
1/200	12.00	21.51	17.45	11.50	11.50	1.69	1.63	16.12
1/200	12.00	19.70	16.40	11.50	11.63	1.56		

Tabla 7.2

Después de esto, cuando la rigidez disponible del muro es escasa, para los últimos niveles de distorsión, esta degradación es más suave.

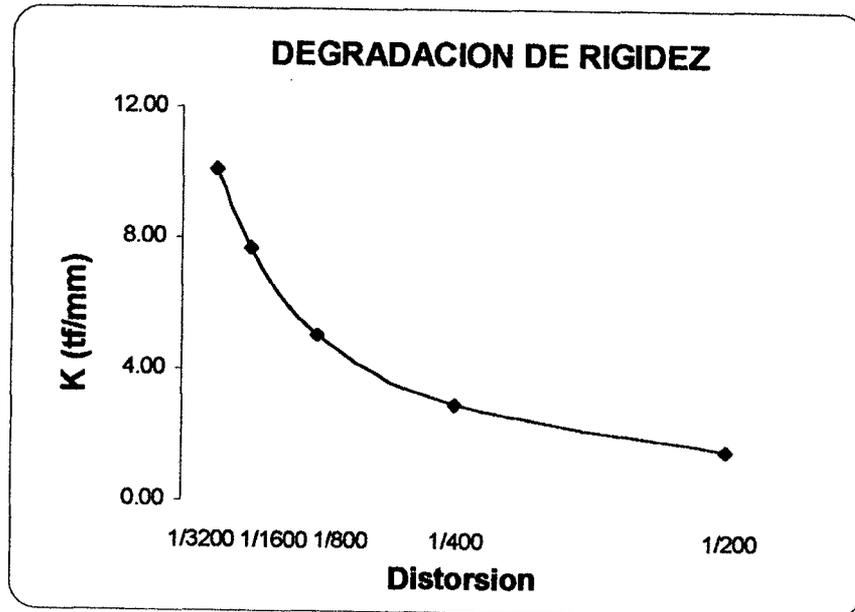


Fig. 7.10

7.2 ENSAYO PSEUDO DINÁMICO

7.2.1 Metodología del Ensayo

Como se describió en el Capítulo IV de esta tesis, la historia de desplazamiento del ensayo Pseudo Dinámico se obtiene a través de la siguiente ecuación:

$$\{X_{i+1}\} = \left([m] + \frac{\Delta t}{2} * [c] \right)^{-1} * \left\{ 2[m]\{X_i\} + \left(\frac{\Delta t}{2} * [c] - [m] \right) * \{X_{i+1}\} - \Delta t^2 * \left(\{F_i\} + [m] * \{1\} \dot{X}_{gi} \right) \right\}$$

De esta expresión, uno puede encontrar que el desplazamiento se obtiene de la próxima carga (en el paso i+1), sólo se puede estimar por las cantidades conocidas. En la fig.7.11 observamos el algoritmo y procedimiento del ensayo Pseudo Dinámico.

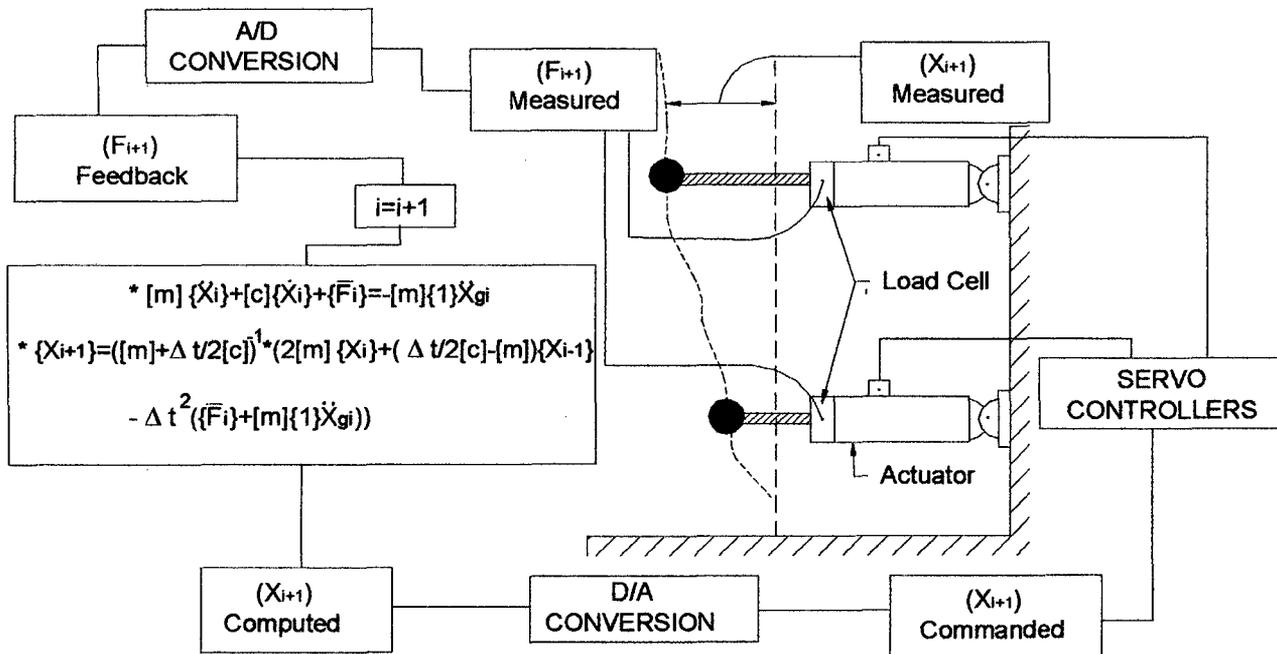
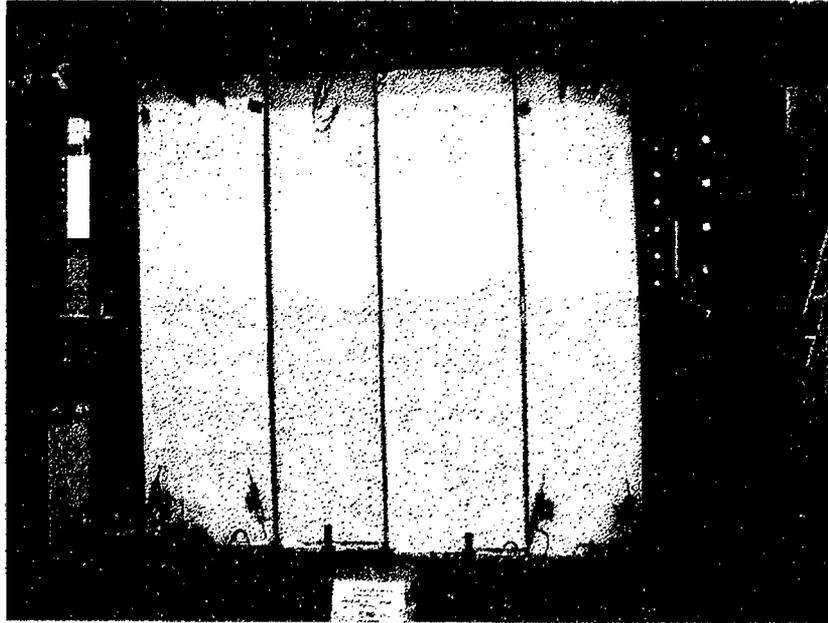


Fig. 7.11 (Algoritmo y procedimiento del Ensayo pseudo Dinámico)

7.2.2 Procesamiento de Datos



Los datos almacenados en el computador, es de un muro de mallas electro soldadas con perfiles de acero, ingresándose como datos el Peso del panel de 0.80 Tn, el archivo del sismo usado fue de Lima66, un PGA max de 500 gals, con un Δt de integración y del registro de 0.01 seg, donde en forma detallada son almacenadas las lecturas paso por paso de la fuerza aplicada por el actuador con sus respectivos desplazamientos y tiempo de integración, tal como se muestra en la tabla 7.2.

PASO	LOAD-H	FEED-H	CH100	CH101	CH102	CH103	CH104	CH105	CH106	CH107	CH108	CH109	CH110	CH111	LOAD-V	FEED-V	T(seg)
1	-2.420	-0.146	-0.021	0.052	-0.012	0.000	0.003	0.014	-0.003	0.002	0.009	0.072	-0.073	0.012	-7.957	-2.521	0.000
2	-2.873	-0.281	0.092	0.125	0.027	-0.006	0.000	0.017	-0.004	0.002	0.008	0.063	-0.072	-0.013	-7.959	-2.374	0.010
3	-3.197	-0.415	0.198	0.198	0.055	-0.013	0.003	0.023	-0.003	0.003	0.009	0.071	-0.015	0.005	-7.961	-2.411	0.020
4	-3.530	-0.562	0.302	0.272	0.085	-0.021	-0.003	0.028	-0.003	0.004	0.008	0.060	0.063	0.006	-7.959	-2.362	0.030
5	-3.778	-0.684	0.397	0.342	0.110	-0.026	-0.009	0.032	-0.002	0.005	0.009	0.062	0.130	0.008	-7.954	-2.264	0.040
6	-4.044	-0.769	0.504	0.415	0.131	-0.036	-0.009	0.033	-0.002	0.005	0.009	0.068	0.206	-0.018	-7.961	-2.289	0.050
7	-4.310	-0.928	0.607	0.494	0.159	-0.043	-0.012	0.037	0.000	0.005	0.010	0.062	0.288	0.010	-7.950	-2.252	0.060
8	-4.514	-1.038	0.699	0.555	0.180	-0.050	-0.012	0.042	0.000	0.005	0.008	-0.016	0.356	-0.010	-7.957	-2.167	0.070
9	-3.963	-0.928	0.616	0.497	0.162	-0.051	-0.012	0.038	0.000	0.005	0.009	-0.010	0.360	-0.015	-7.956	-2.301	0.080
10	-3.580	-0.781	0.513	0.430	0.137	-0.051	-0.009	0.039	0.000	0.005	0.008	-0.018	0.345	-0.002	-7.964	-2.277	0.090

Tabla 7.2

Tales datos son almacenados en un archivo ASCII, los cuales pueden ser importados por una hoja de cálculo para su procesamiento. Los transductores LVDT distribuidos en todo el espécimen son enumerados desde el "100" hasta el "111".

7.2.3 Interpretación de Resultados:

De igual manera que en el ensayo de Carga Lateral Cíclica, de este ensayo se obtiene el Comportamiento Histerético tal como se muestra en la fig.7.12, la Curva Envolvente, La Degradación De La Rigidez y además la Curva De Tiempo Historia De Desplazamiento como se observa en la fig.7.13.

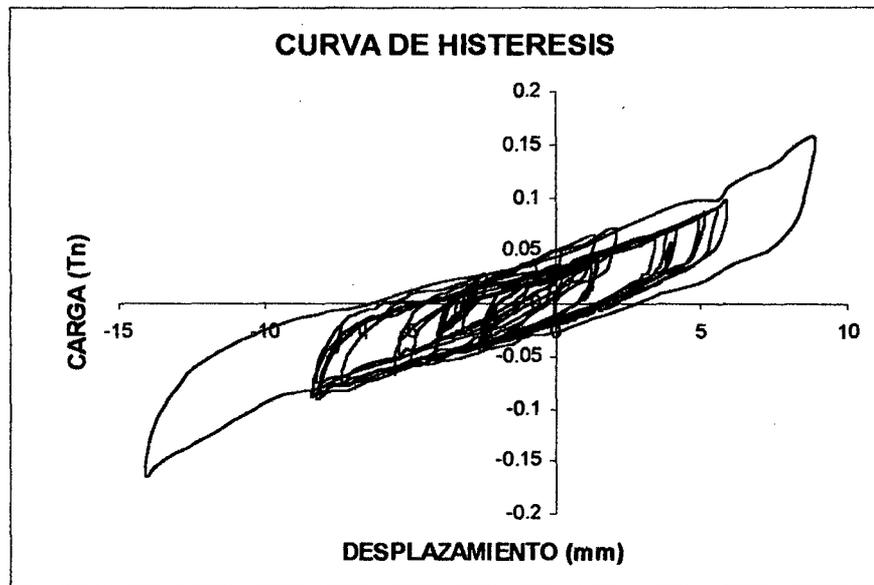
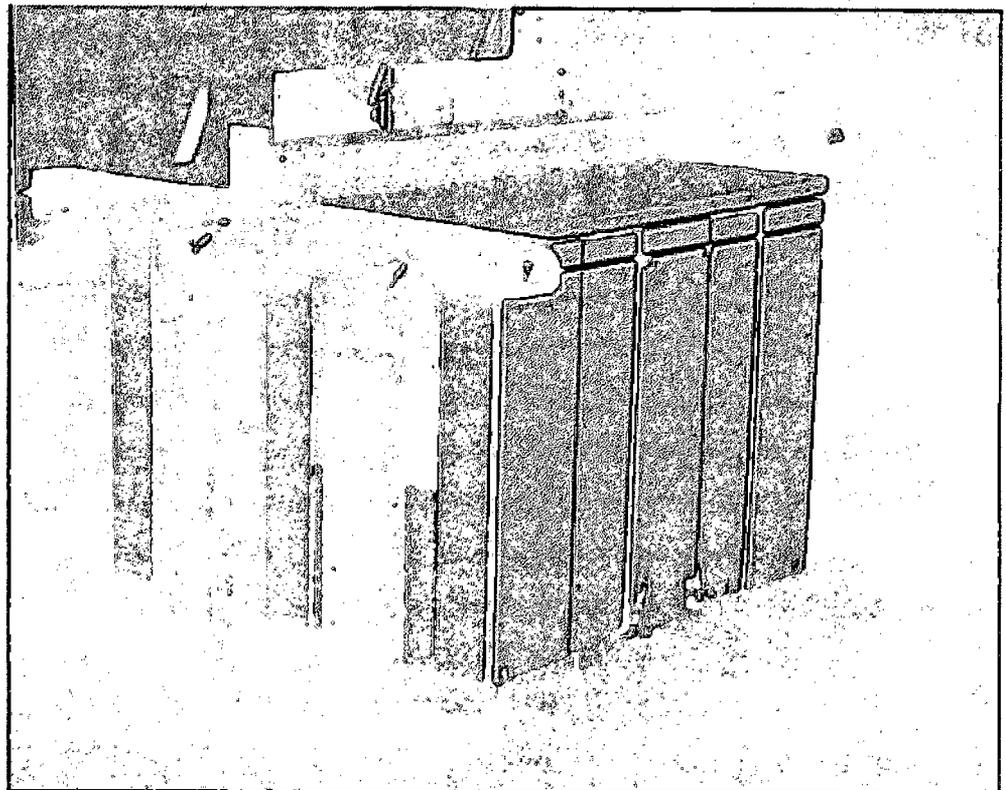


Fig. 7.12 Comportamiento histerético

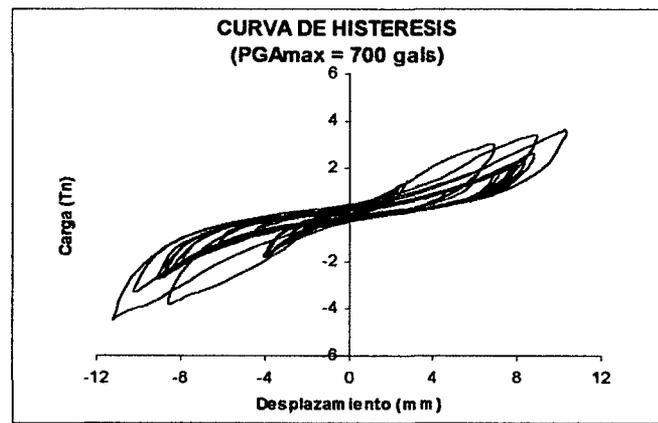
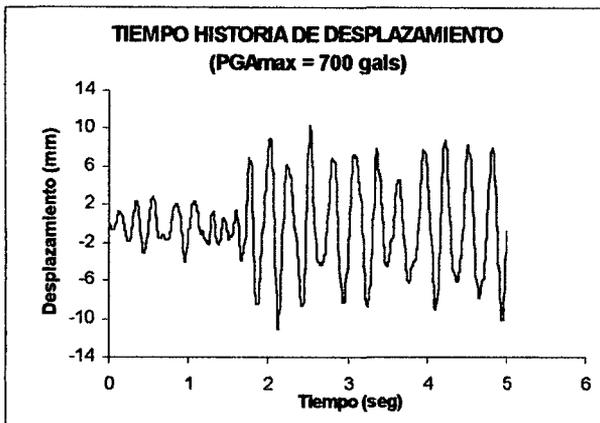
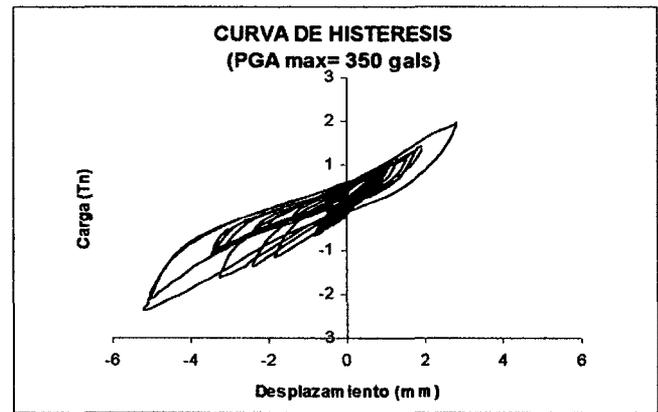
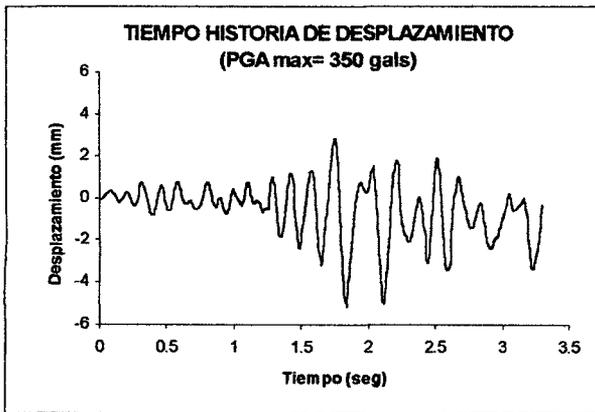


Fig. 7.13 Curva De Tiempo Historia De Desplazamiento

En el Laboratorio de Estructuras del CISMID, también se ensayo con el programa Pseudo Dinámico un módulo de un piso construido con el mismo material que el muro ensayado, ingresándose como datos el Peso del módulo de 3.85 Tn, el archivo del sismo usado fue de Lima66, con un Δt de integración y del registro de 0.01 seg tal ensayo tuvo dos variantes, primero se ensayo con un PGA máx de 350 gals y 700 gals, obteniéndose los siguientes resultados (Ref. 14):



Modulo de un piso ensayado con el programa Pseudo Dinámico.



CAPITULO VIII

COMENTARIOS Y CONCLUSIONES

8.1 Papel de la Prueba on-line en el estudio de la Ingeniería Sísmica

En esta tesis, se muestra una descripción del uso de la computadora en el desarrollo del ensayo pseudo - dinámico, aplicaciones a varios problemas estructurales realizados por investigadores japoneses, problemas encontrados en su aplicación y algunas de las nuevas aplicaciones que utilizan el concepto de la prueba on-line. Basados en estas descripciones, los mayores roles de la prueba on-line en estudios de la respuesta sísmica se pueden exponer como sigue:

1. Se ha encontrado que el ensayo pseudo - dinámico es una técnica capaz de simular el comportamiento histerético real de sistemas estructurales. Esta prueba es utilizada por ser más eficaz en obtener información sobre el comportamiento histerético de sistemas estructurales que las pruebas semi-estáticas convencionales, las cuales sólo pueden realizarse bajo idealizaciones simplificadas, e historias de cargas predeterminadas. Hay numerosos modelos histeréticos matemáticos desarrollados con el propósito

de reproducirse la conducta histerética de varios elementos estructurales, uniones, y sistemas. El ensayo pseudo - dinámico probablemente es el mejor método para calibrar la exactitud de estos modelos matemáticos.

2. Debido a la capacidad del ensayo pseudo - dinámico en la simulación de respuesta sísmica, se puede utilizar directamente para encontrar la respuesta sísmica en sistemas estructurales complejos en los que se combinan varios tipos de propiedades estructurales y materiales. Las características histeréticas de esos sistemas compuestos o mixtos son normalmente demasiados complejos para ser modelados adecuadamente, particularmente en las uniones donde se conectan entre sí las diferentes propiedades. Algunos de estos sistemas estructurales compuestos podrían ser examinados eficazmente con el ensayo pseudo - dinámico.
3. Es la mejor técnica, no tiene limitación en cuanto al tamaño del espécimen, hecho que supera al ensayo de mesa vibradora.

8.2 Nuevas Dimensiones de la Prueba On-Line

El concepto del ensayo pseudo - dinámico puede entenderse en varias maneras. Algunas de las nuevas dimensiones del ensayo pseudo - dinámico pueden conocerse como sigue.

1. El ensayo pseudo - dinámico parece tener un alto potencial para examinar el comportamiento de respuesta sísmica de sistemas estructurales contruidos de materiales cuyas propiedades son sensibles a la variación de carga, y también para investigar el efecto de la variación de carga en el comportamiento histerético de sistema estructurales. Para lograr que la

rapidez en el ensayo pseudo - dinámico sea factible, ambos, el software y hardware necesitan perfeccionar algoritmos para proporcionar alta velocidad de procesamiento. Debe tenerse cuidado después de la medición de la fuerza de reacción y la carga aplicada dinámicamente, la lectura de la celda de carga pueden incluir la fuerza inercial del espécimen ensayado y el instrumento y, por consiguiente, no representa necesariamente la fuerza de reacción del espécimen.

2. El desarrollo de nuevos algoritmos de integración que podrían asegurar soluciones estables en las ecuaciones de movimiento con un gran número de grados de libertad es la clave para el éxito de esta prueba. El control del actuador a través de la combinación de la fuerza y el desplazamiento parece ser efectivo en relación con la alta rigidez y/o grados de libertad de la pequeña masa rotacional que probablemente será incluida en la sub estructura del ensayo pseudo - dinámico.
3. Considerando que los hardwares experimentales utilizados en el ensayo pseudo - dinámico son mucho más maniobrables que aquellos que fueron usados en la prueba de mesa vibradora, el ensayo pseudo - dinámico puede emplearse sin dificultad en el sitio (no en el laboratorio). El sistema del ensayo pseudo - dinámico puede transportarse y colocarse en el sitio de un sistema estructural que necesite ser ensayado para su respuesta sísmica. El uso de micro computadoras para el control de la prueba parece ser eficiente para dicho ensayo. (*Ref. 3 - pag. 28-30*)

8.3 Conclusiones

En esta tesis se presenta la diversidad de equipos y software desarrollados para ser usados en el Laboratorio de Estructuras del CISMID de manera que se pueda efectuar ensayos a escala natural y/o a escalas reducidas. También se han presentado las técnicas para llevar a cabo dichos ensayos, ya sea ensayos Cíclicos o Pseudo Dinámicos.

El método de Ensayos Pseudo Dinámico, es una técnica que combina los procedimientos experimentales con el análisis numérico mediante un control en línea por computadora, permitiendo evaluar el comportamiento sísmico de la estructura ensayada.

Con el método de Ensayos Pseudo Dinámico es posible ensayar especímenes grandes que sobrepasan la capacidad de las mesas vibratoras.

También permite la observación detenida y en detalle del comportamiento de la estructura así como la propagación de los daños durante el desarrollo del ensayo ya que la estructura es cargada casi estáticamente, lo cual no sería factible, por ejemplo, en el ensayo de mesa vibradora puesto que este ensayo es de corta duración generalmente de 10 a 30 segundos.

El método de la diferencia central para el Ensayo Pseudo Dinámico es condicionalmente estable y tiene adecuada precisión cuando el intervalo de tiempo es pequeño. La condición de estabilidad esta dada por: $\Delta t \leq 0.01 \text{seg}$.

La principal ventaja del método de Ensayo Pseudo Dinámico es que no requiere hacer suposiciones sobre las características de rigidez de la estructura ya que el término de la fuerza restauradora se obtiene directamente del ensayo. Por lo tanto, el método de Ensayo Pseudo Dinámico es sumamente útil cuando se está analizando el comportamiento inelástico de la estructura.

Para resolver las ecuaciones de movimiento, se tiene que asumir el amortiguamiento viscoso que generalmente se toma proporcional a la matriz de rigidez inicial o proporcional a la matriz de masas o una combinación de ambas.

8.4 Comparación del programa antiguo y actual.

El Laboratorio de Estructuras del CISMID, antes del desarrollo de los programas descritos en esta tesis, contaba con un software elaborado en versión D.O.S. tanto par el ensayo Cíclico como para el Pseudo Dinámico.

Con el desarrollo de este estudio se logro elaborar un programa versátil y de fácil uso. Las ventajas que presenta este programa con respecto al anterior son los siguientes:

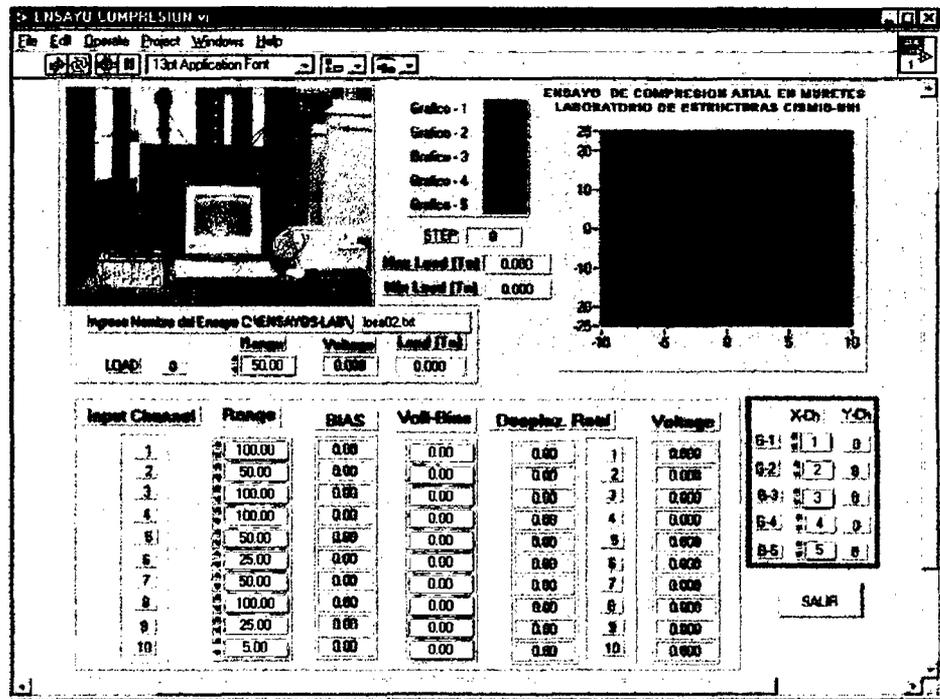
- El uso del SCANNING BOX y el UCAM es reemplazado por la Unidad de Adquisición de Datos.
- Con la nueva tarjeta de adquisición de datos podemos enviar y recibir señales usando solo una computadora (con velocidad de adquisición de datos de hasta 1000 Hz), mientras que el sistema precedente usaba una computadora para enviar señales y otra para recibirlas.

- Con este programa se logró mejorar el ingreso así como la salida de datos.
- El nuevo software es ejecutado en ambiente WINDOWS 98, el cual, como muchos conocemos es mucho más práctico y fácil de usar que el D.O.S.
- El sistema anterior debía usar obligatoriamente una impresora durante el ensayo, la cual imprimía los datos de salida para cada paso. El software aquí presentado guarda los resultados en el disco duro de la computadora simultáneamente al tiempo de ejecución.
- Con este software se hace más fácil el procesamiento de datos, la salida está dada de tal manera que cada columna contiene los datos del número de pasos, carga aplicada por el actuador y los desplazamientos de cada uno de los transductores. El tipo de salida del sistema antiguo hace que el procesamiento sea más tedioso.

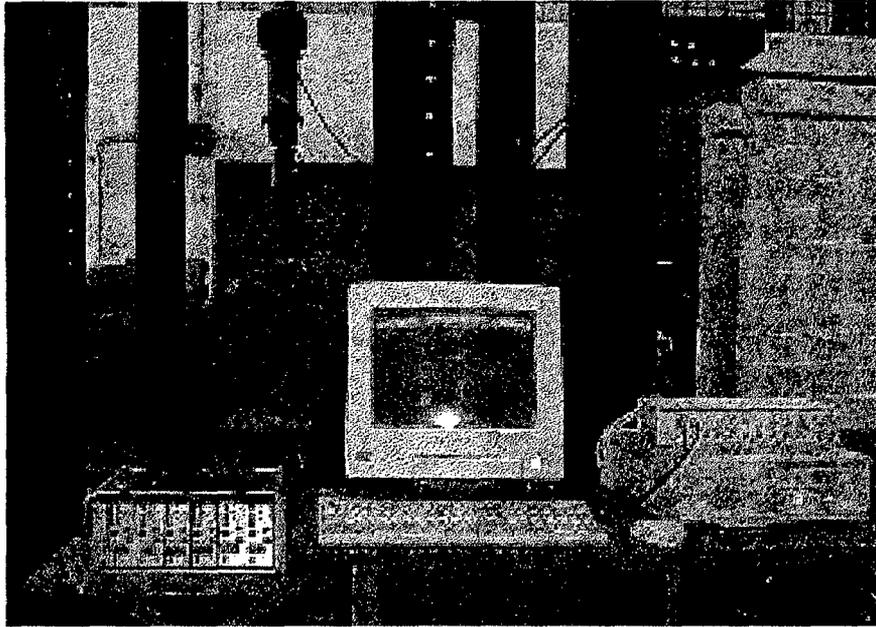
ANEXOS

1. OTRAS APLICACIONES USANDO EL LAB VIEW

Usando la misma Tarjeta de Adquisición de Datos para el programa Cíclico y Pseudo Dinámico, se desarrolló un programa para la adquisición de datos de 10 canales, la cual puede graficar simultáneamente 5 sensores Carga Vs. Deformación, este programa es usado en la Máquina Universal empleada para ensayos a compresión, para la Máquina de Tracción y Compresión, y para los gatos hidráulicos, tal como se muestran en la siguientes fotos:



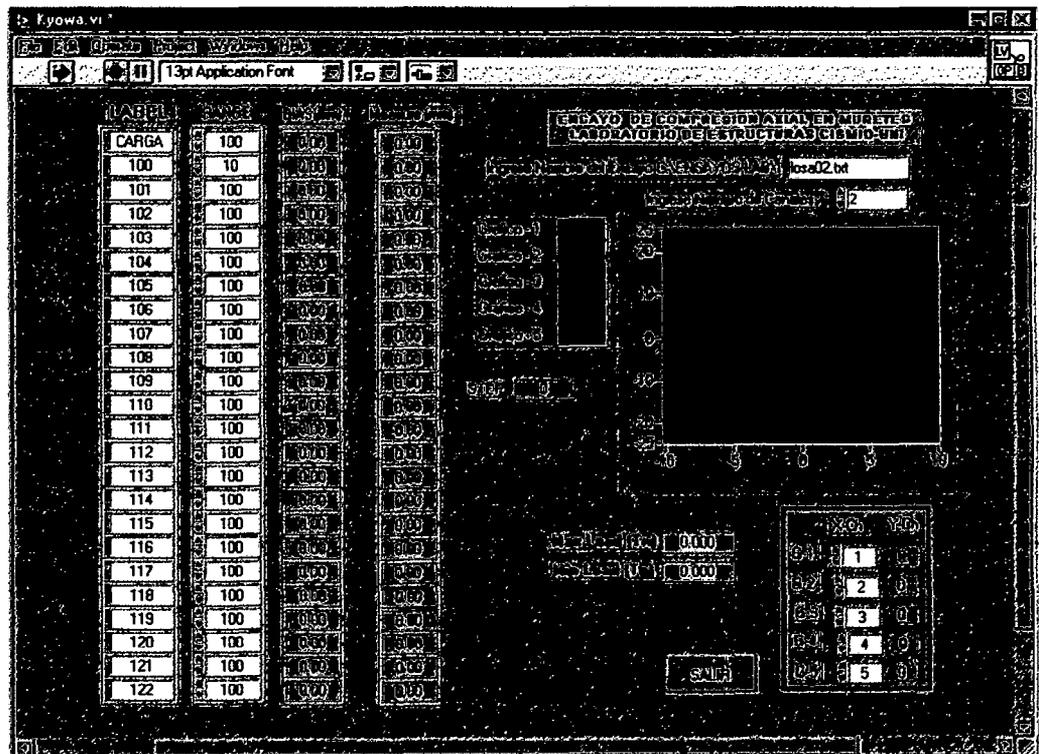
Presentación de la Ventana del Programa de Adquisición de Datos.



En esta foto se muestra el equipo empleado para los ensayos de Adquisición
de Datos

Otro Sistema de Adquisición de Datos es usando una tarjeta GPIB instalada en otra computadora, con la cual podemos usar dos juegos de equipos diferentes.

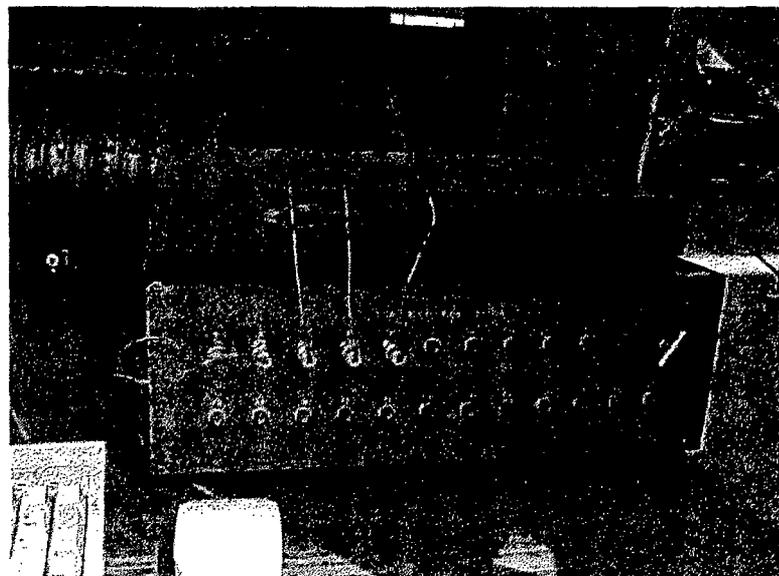
1. El primer juego de equipo es usando un amplificador de señales que se complementa con una caja convertidor de señales "KYOWA", la cual va unida a la computadora vía interface GPIB. Para usar este juego de equipo se desarrolló un programa para la adquisición de datos de 24 canales, la cual puede graficar simultáneamente 5 sensores Carga Vs. Deformación, este programa es también usado en la Máquina Universal, la Máquina de Tracción y Compresión, y para los gatos hidráulicos.



Presentación de la Ventana del Programa de Adquisición de Datos

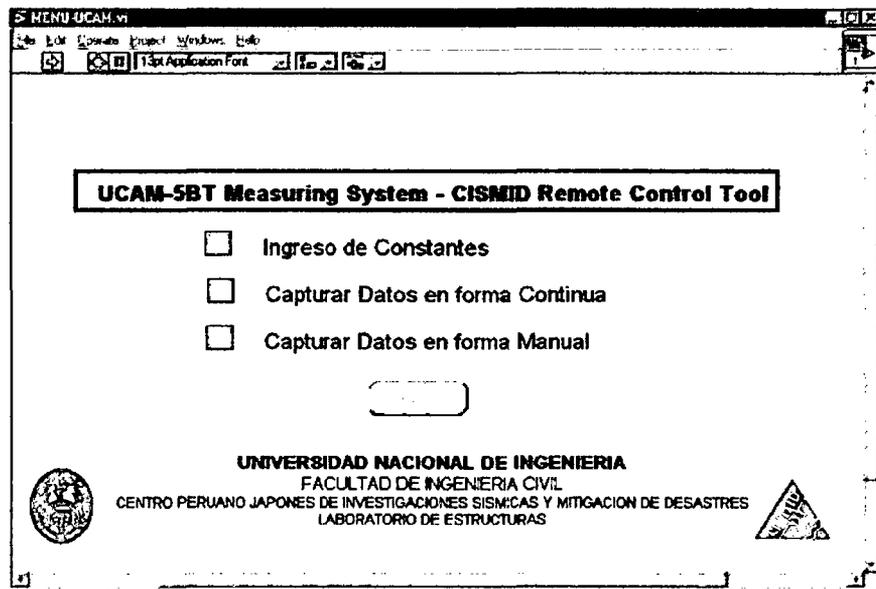


En esta foto se muestra el equipo empleado para los ensayos de Adquisición de Datos, usando el convertidor de señales KYOWA.

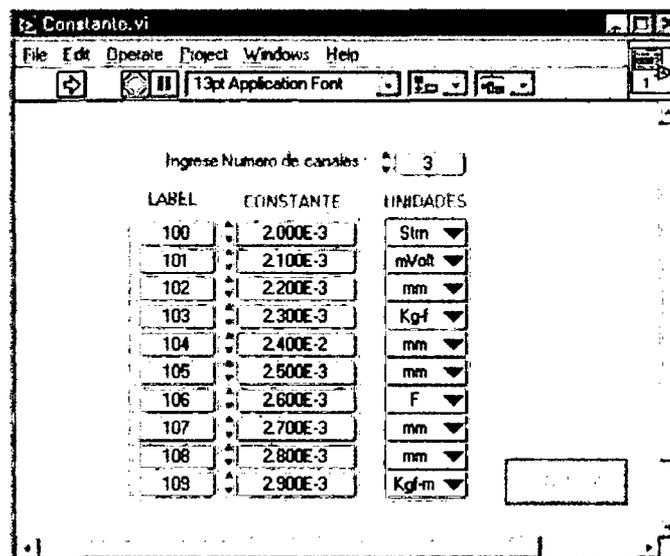


Conversor de Señales KYOWA.

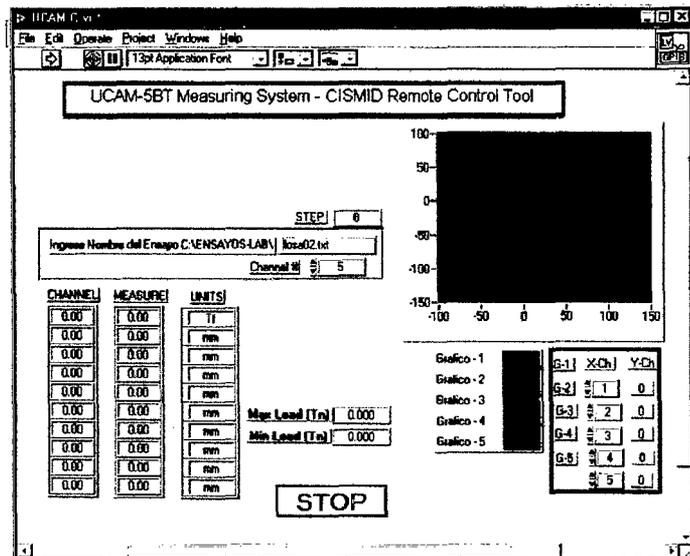
2. El segundo juego de equipos es usando una Unidad de Adquisición de Señales UCAM-5B la cual va unida a la computadora vía interface GPIB. Para usar este juego de equipo se desarrollo un programa para la adquisición de datos de 10 canales, la cual puede graficar simultáneamente 5 sensores Carga Vs. Deformación, este programa es también usado en la Máquina Universal, la Máquina de Tracción y Compresión, y para los gatos hidráulicos



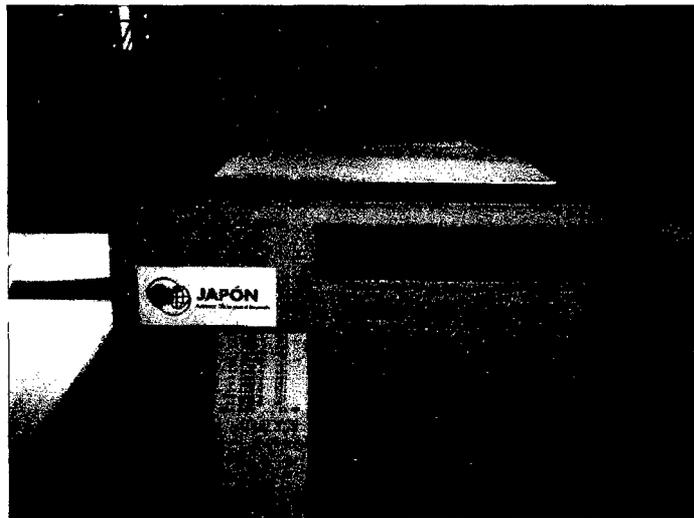
Menú Principal del Programa de Adquisición de Señales



Opción 1: Ingreso de las Constantes



Opción 2 o 3: Inicio del Programa, Ventana para la Adquisición de Datos en forma Continua ó Manual.

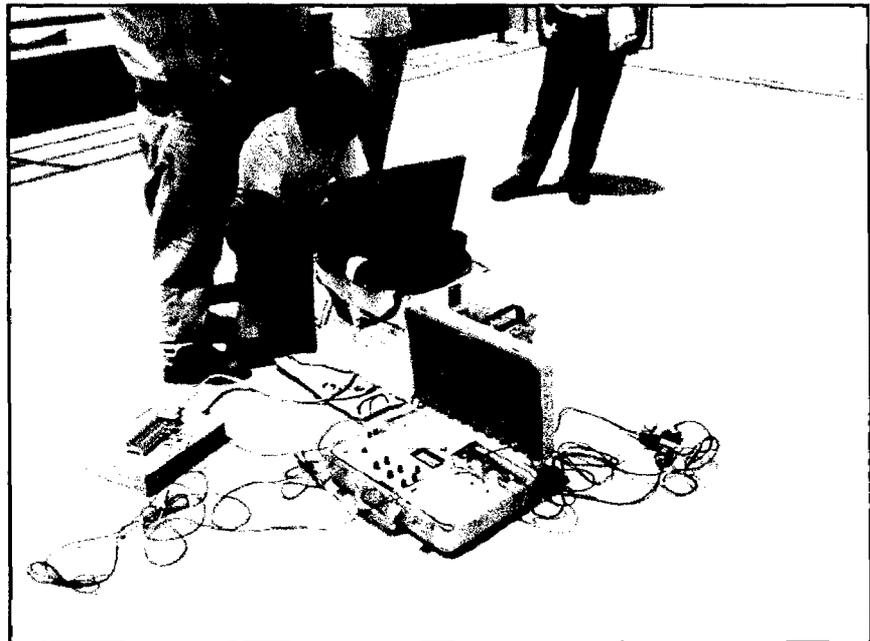


Unidad de Adquisición de Señales UCAM-5B



Equipos para la Adquisición de Datos de la Máquina Universal y Máquina a Compresión.

El Laboratorio de Estructuras del CISMID también cuenta con una computadora portátil, en la cual está incorporada una tarjeta de Adquisición de Datos, en donde también se desarrolló un software para implementar el equipo usado en el ensayo de Microtrepidaciones.



2. APLICACIÓN DE MICROCOMPUTADORAS DE CONTROL DIGITAL EN ESTRATEGIAS PARA LA REDUCCION DE LA RESPUESTA ESTRUCTURAL

En el pasado, las aplicaciones de estrategias en el control de estructuras activas que emplean PC basado en hardware han sido a menudo problemáticas, y de allí parece ser una necesidad de mejorar la comprensión de los problemas asociadas con la aplicación del control digital, así como para reducir los tiempos de procesamiento excesivos requeridos para los procesos de I/O y cálculo del control de fuerzas. El hardware recientemente desarrollado se basó en el proceso de señal digital (DSP), los chips han ofrecido nuevas posibilidades para la aplicación de algoritmo de control.

INTRODUCCIÓN

El control estructural ha recibido una amplia atención en los recientes años. Sin embargo, en la práctica la aplicación del control digital para las aplicaciones estructurales está llena de muchos problemas que deben entenderse y resolverse para la aplicación exitosa del controlador. En el pasado, el hardware utilizado era un típico controlador digital incluido en una computadora personal (PC) para realizar cálculos de algoritmo de control y una tarjeta de adquisición de datos. Las tareas primarias de la tarjeta de adquisición de datos eran ejecutar la conversión de señales de analógico a digital (A/D) y realizar la conversión digital a analógico (D/A), la orden es calculada por el programa de control. Esta configuración tiene muchos inconvenientes. El tiempo requerido para realizar todas las operaciones de A/D y D/A pasan sobre la PC en el campo de I/O, así como para realizar los cálculos del algoritmo en la PC, este proceso puede requerir un periodo largo y también puede inducir a

retrasos de largos tiempo inaceptable. También, esta configuración hace muy difícil de crear un modelo de supervisión de control que permita al operador monitorear e interactuar recíprocamente con el controlador mientras que la PC está ocupada realizando operaciones de control.

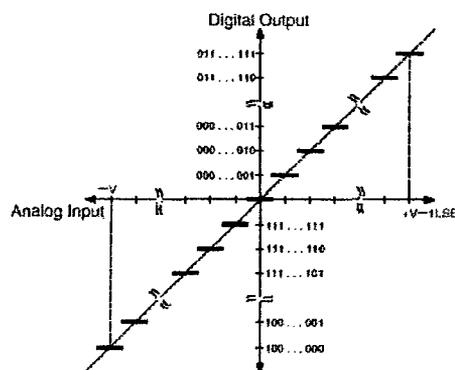
2.1 CONTROL DIGITAL

Hay muchas ventajas para el uso de un sistema de control digital sobre los convencionales controladores analógicos. Una de las principales ventajas es el código de control que fácilmente puede ser usado y modificado simplemente cambiando el programa de computo llevado a cabo en el esquema del control digital. Adicionalmente, los esquemas del control digital admiten la adquisición relativamente simple con un alto grado de precisión en la aplicación de un controlador, considerando que los controladores analógicos pueden requerir elaborados circuitos que son demasiados caros para lograr el mismo nivel de precisión para un código de control dado. También, el control digital permite una aplicación más simple del esquema de control no-lineal y se da el lujo de usar la capacidad de decisión en forma lógica dentro del controlador para que puedan incorporarse técnicas de control de fácil supervisión. Tales técnicas permitirán eventos como el monitoreo y el funcionamiento del sistema del control por una computadora utilizando la supervisión y parar el seguro del sistema en caso del funcionamiento del sistema más allá de los límites aceptables de operación.

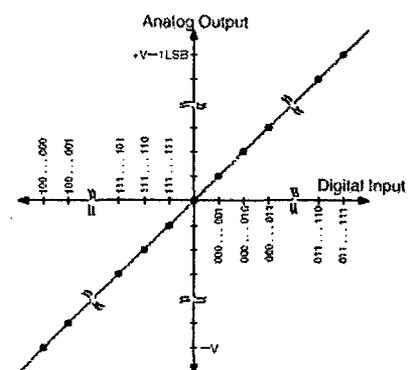
2.2 DISPOSITIVOS DE I/O

El propósito de los dispositivos de A/D y D/A en un sistema de muestra de datos es comprender los trazos de las señales analógicos que ocurren en la

porción del tiempo-continuo del sistema en las señales digitales que los representan en la porción del tiempo-discreto, y recíprocamente. En un sentido técnico, estos trazos no pueden ser lineales según los principios del álgebra moderna. Sin embargo, en ciertos gráficos se muestran trazos, que parecen funciones que son líneas casi rectas. Por ejemplo, un dispositivo de A/D convierte una señal analógica en un número digital binario según la relación que se aproxima a una línea recta, como se ilustró en la Figura a. Los dispositivos de D/A convierten un número digital binario a una señal analógico por una relación como se muestra en la Figura b, y si n fuera lo bastante grande para que 2^n fueran muy grandes, entonces el error del cuantización podría ser modelado uniformemente como una variable aleatoria uniformemente distribuida entre. Los errores de cuantización pueden tratarse como fuentes de ruido que directamente distorsionan el equipo en cantidades moderadas y el control de señales u respectivamente.



(a) A/D Converter.



(b) D/A Converter.

En particular, en muchos casos puede ser crítico que la salida de un dispositivo sean igual a 0 cuando la entrada es 0. Las actuales características de los dispositivos pueden ser establecidas proporcionando entradas conocidas a cada dispositivo y midiendo las salidas.

2.3 CONTROLADORES EN LA APLICACIÓN DEL HARDWARE DIGITAL

Una manera típica en que se llevaron a cabo los esquemas de control digital en el pasado habían terminado con el uso de tarjetas de adquisición de los datos con la expansión de la conexión con la PC. En esta configuración, la tarjeta de adquisición de datos se programaría para tomar muestras con sistema de medición de cantidades a intervalos regulares. Cuando este disponible, las muestras de las cantidades medidas pasarían al CPU principal a través de I/O de la PC. La PC realizara los cálculos aritméticos requeridos para la aplicación del filtro digital y enviar los resultados a través de I/O a dispositivos de D/A para la conversión de salida

Esta configuración tiene muchos inconvenientes. El tiempo exigido para realizar todas las funciones de A/D y D/A y pasar estas cantidades sobre I/O de la PC, así como realizar las operaciones del algoritmo de control en la PC, puede requerir indeseables periodos largos en sacar una muestra e inducir a retrasos de tiempo inaceptables. También, con semejante configuración de equipo, es muy difícil de crear un esquema que permita al operador monitorear e interactuar con el controlador mientras la PC está obligada a realizar los análisis del control.

Un arreglo más poderoso para la aplicación de un sistema de control digital es realizable a través del uso de una de las muchas tarjetas diferentes DSP disponibles la cual se pone en la extensión de conexión de una computadora personal. El estado del arte de los chips DSP permiten un procesamiento muy rápido, acelerando así el proceso especializado. Las tarjetas DSP tienen conversores de A/D y D/A localizados en la tarjeta que

reduce el retraso involucrado en la transmisión de señales entre el procesador y los dispositivos de I/O. Tales configuraciones habilitan el control y monitoreo de la tarjeta DSP por la PC en un esquema de control de monitoreo. Esto permite que las tarjetas DSP dirijan los actuales procesos de control mientras que la PC vigila el funcionamiento de la tarjeta DSP y proporciona información actualizada del sistema al operador. (**Ref. 6**)

3. RESPUESTA INELÁSTICA DE SISTEMAS ESTRUCTURALES

La mayoría de los reglamentos para edificios sismorresistente, se basan en la disipación de la energía sísmica mediante deformaciones inelásticas de la estructura. Por ello es importante conocer, cuál es el comportamiento de la estructura en el rango inelástico; estas consideraciones permiten un diseño económico y seguro.

En el diseño sismo resistente de edificaciones, para un sismo severo, hay dos objetivos principales que se deben cumplir:

- El primero y más importante es evitar el colapso.
- El segundo es reducir los daños estructurales y no estructurales.

El primer objetivo se puede lograr induciendo que después de la fluencia de algunos elementos se formen mecanismos estables, garantizando que estos elementos en fluencia tengan la capacidad de desarrollar considerables deformaciones inelásticas sin que ocurra una falla del elemento.

Los conceptos de deformabilidad, ductilidad y factor de ductilidad, están relacionados con este objetivo, por lo cual será necesario conocer sus diferencias tanto como su interrelación.

Deformabilidad: Es la capacidad de un material, elemento estructural o de toda la estructura a deformarse antes del colapso.

Ductilidad: Es la capacidad del material, elemento estructural o de toda la estructura de deformarse después de la fluencia inicial sin pérdida significativa de resistencia.

Factor de Ductilidad: Es la relación entre la máxima deformación que un elemento o estructura puede soportar y la deformación inicial de fluencia.

El segundo objetivo, es lograr que el daño económico y social sea mínimo.

Aunque podría magnificarse el daño en función de la energía disipada, algunos autores proponen que el nivel de daño esté relacionado con el desplazamiento relativo del entrepiso.

Cuando una estructura es capaz de responder inelásticamente a un nivel de diseño sísmico sin degradación significativa de su resistencia, se dice que posee ductilidad. La ductilidad perfecta es definida por el modelo ideal elastoplástico Fig.3.1(a), la cual describe una respuesta típica en términos de la fuerza inercial. Los diagramas de esta forma son llamados curvas de histéresis. Las curvas de histéresis típicas de concreto reforzado y estructuras de

albañilería son las mostradas en le fig.3.1(b) a (f). Estos ciclos de histéresis pueden ser muy estrechos, indicándonos una baja absorción de energía.

Los ciclos de histéresis que se muestran en la fig.3.1(a) a (e) representan un comportamiento dúctil, en la que no indican una degradación excesiva de su resistencia con el incremento del desplazamiento o con los ciclos sucesivos. Los ciclos de las fig 3.1(a) y 3.1(b) son los preferidos, dado que el área que encierran los ciclos es una medida de la energía que puede ser disipada. La deformación inelástica por corte resulta en una degradación como se puede apreciar en la fig.3.1(f). Para describir el comportamiento representado por la fig.3.1 se requiere una definición cuidadosa de las reglas de histéresis.

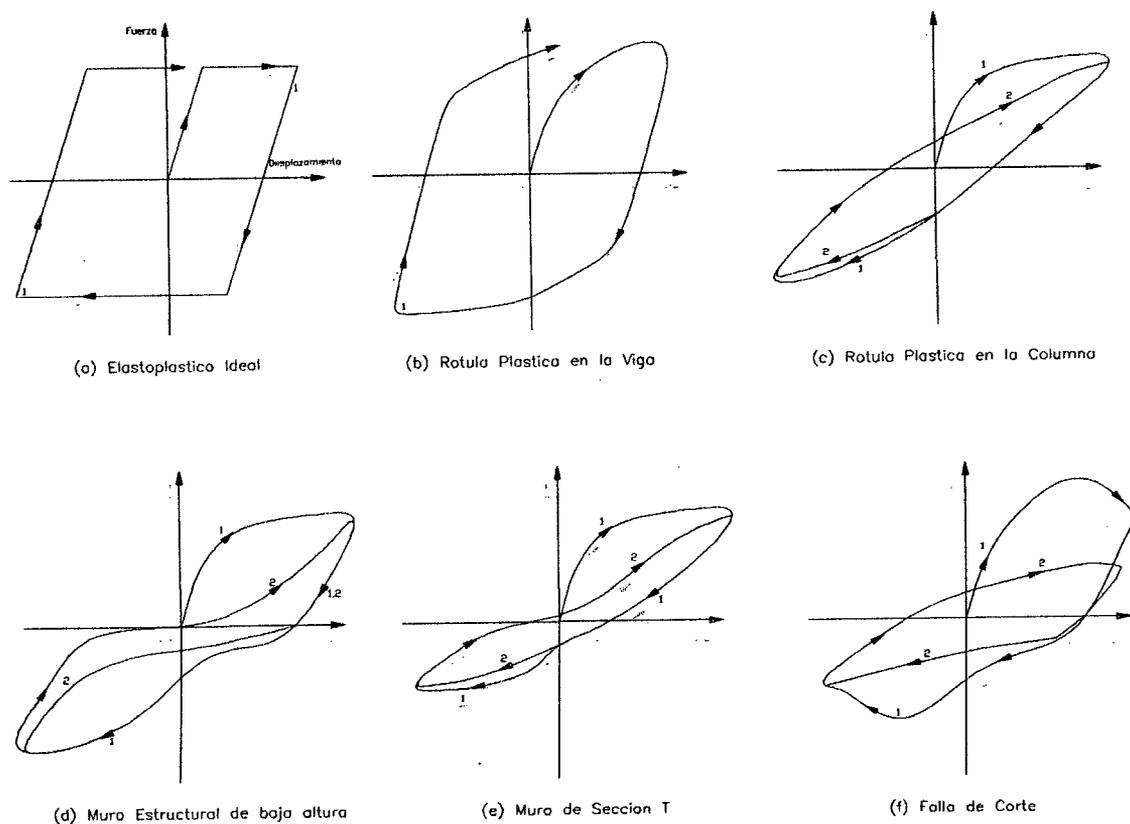


Fig.3.1 Curvas De histéresis Típicas Para Elementos De Concreto Albañilería Estructural

4 MODELOS DE HISTÉRESIS DE LAS ESTRUCTURAS PARA EL ANÁLISIS DE RESPUESTA SÍSMICA

Los modelos se obtienen a partir de los resultados de ensayos de laboratorio, tratando de definirlos con características simples. Para estudiar la respuesta inelástica de un sistema discreto de masas, se debe establecer un modelo matemático de las características de fuerza de restitución y de aquí definir la relación entre la fuerza cortante en el entrepiso y la deflexión del mismo. Para una secuencia progresiva de cargas y descargas, la línea que une a los puntos pico en la curva carga deflexión de cada secuencia de carga se llama curva esquelética. En muchos casos la curva esquelética coincide con la carga monotónica.

Los modelos histeréticos son necesarios para simular el comportamiento de los elementos que están sometidos a cargas cíclicas y deben ser capaces de representar la rigidez y resistencia del miembro, las cuales varían en cada instante de tiempo con la historia de las cargas y deformaciones producidas por los movimientos sísmicos. La mayoría de los modelos matemáticos se simplifican de acuerdo con el nivel requerido de análisis. A continuación se describen brevemente diferentes modelos. Para ello se usan las siguientes definiciones para simplificar la descripción de las condiciones de histéresis.

CARGA: Es la amplitud (positivo o negativo) del incremento de la resistencia sin cambio en el signo.

DESCARGA: Es la amplitud (positivo o negativo) del decremento de la resistencia sin cambio en el signo.

INVERSIÓN DE CARGA: Es cuando el signo de la resistencia y el punto de respuesta cruzan el eje del desplazamiento.

CURVA PRIMARIA: Se denomina así a la curva que existe en la relación resistencia – desplazamiento bajo un incremento de carga monótona.

Se asume que la curva primaria es simétrica alrededor del origen, la curva primaria es representada por las líneas “bilineal” o “trilineal” con cambios de rigideces en los puntos de agrietamiento (C) y el punto de fluencia (Y).

El índice de disipación de energía histerética (E_h) es usado para expresar la cantidad de disipación de energía por ciclo durante desplazamientos de igual magnitud en la dirección negativa y positiva.

$$E_h = \frac{\Delta W}{2 * \pi * F_m * D_m} \dots\dots\dots(1)$$

Donde F_m es la resistencia para un desplazamiento pico D_m . El valor del índice es igual al factor de amortiguamiento viscoso de un sistema linealmente elástico, el cual es capaz de disipar energía ΔW en un ciclo.

4.1 MODELO DE HISTÉRESIS BILINEAL.

Es uno de los modelos más sencillos, modela apropiadamente un pórtico de concreto con bajo contenido de refuerzo y con adecuada resistencia de corte. Usa una curva primaria bilineal. Para simular las características de endurecimiento por deformación del acero y el concreto reforzado, se asigna una pendiente positiva para la rigidez después de la fluencia. Cuando el

miembro de concreto se empieza a degradar, la rigidez de carga y descarga se reduce en función del desplazamiento máximo anterior en la forma:

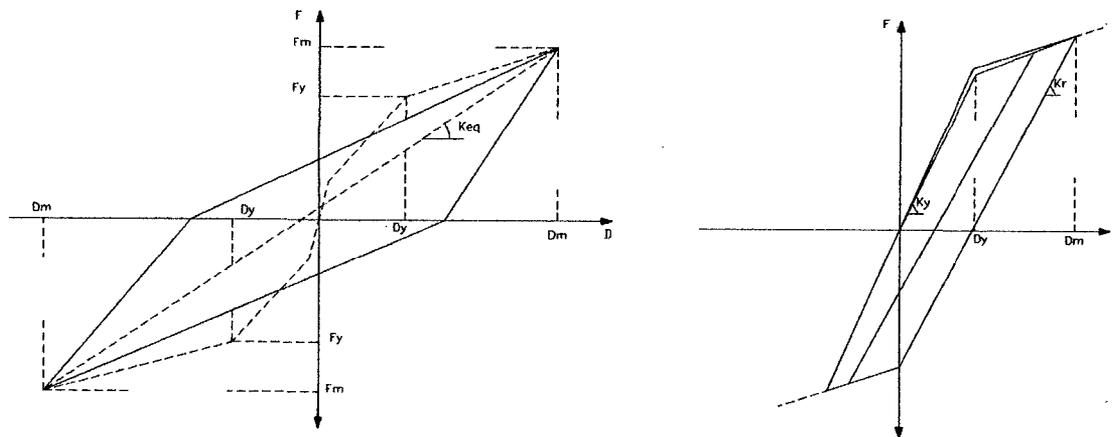
$$K_r = k_v \frac{D_m^{-\alpha}}{D_y} \dots\dots(2)$$

donde:

α = parámetro de la degradación de la rigidez en la descarga ($0 \leq \alpha \leq 1$)

K_y = Rigidez elástica inicial.

D_m = desplazamiento máximo alcanzado en el paso anterior en cualquier dirección.



Indice de Disipación de Energía Histerética

Modelo de Histéresis Bilineal Degradante

Fig.4.1

La rigidez de descarga permanece constante hasta que la respuesta de desplazamiento exceda el desplazamiento máximo previo en cada dirección. Este modelo bilineal no disipa energía histerética hasta que la fluencia sea desarrollada. El índice de disipación de energía histerética del modelo bilineal degradante es dado por:

$$E_h = \frac{2(1-\beta)\{\mu - \mu^\alpha(1-\beta + \mu\beta)\}}{\mu(1-\beta + \mu\beta)(1-\beta\mu^\alpha)} \dots\dots(3)$$

En la cual β es la relación de la rigidez de post – fluencia a la rigidez elástica inicial y μ es el factor de ductilidad (relación del desplazamiento

máximo al desplazamiento de fluencia inicial). Esta relación es válida solo cuando el factor de ductilidad es mayor que la unidad.

4.2 MODELO RAMBERG – OSGOOD

El modelo de Ramberg – Osgood es usado por su capacidad de trazar una degradación de la rigidez. El modelo consiste de una curva esquelética y una familia de curva de histéresis Fig.4.2

La curva esquelética es expresada como:

$$\frac{\varepsilon}{\varepsilon_y} = \frac{\sigma}{\sigma_y} \left[1 + \alpha \left(\frac{\sigma}{\sigma_y} \right)^{\eta-1} \right] \dots\dots\dots(4)$$

Donde: σ , σ_y , ε y ε_y son el esfuerzo de fluencia, la deformación y la deformación de fluencia respectivamente; α y η son dos coeficientes que definen la forma de la curva. El modulo tangente inicial es igual a $(\sigma_y / \varepsilon_y)$. La curva primaria es controlada por el exponente η , desde linealmente elástico ($\eta=1$) a elastoplástico ($\eta=\infty$). Para valores grandes de η , el comportamiento es similar al modelo bilineal.

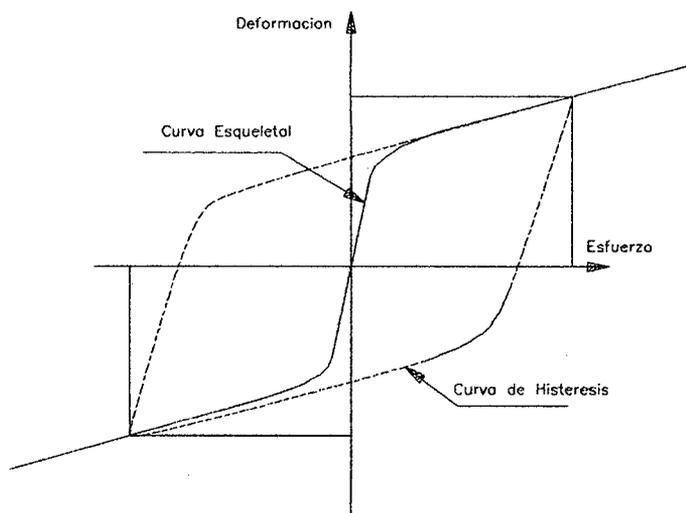


Fig.4.2 Modelo Ramberg - Osgood

La curva histerética es controlada por:

$$\frac{\varepsilon - \varepsilon_0}{2\varepsilon_y} = \frac{\sigma - \sigma_0}{2\sigma_y} \left(1 + \alpha \frac{\sigma - \sigma_0}{2\sigma_y}^{\eta-1} \right) \dots\dots\dots(5)$$

Donde: σ_0 , y ε_0 indican las coordenadas del origen de la curva, que es el punto de carga reversa más reciente. La curva de histéresis es la misma en forma que la curva esquelética pero aumentada en dos veces para ambos ejes: vertical (esfuerzos) y horizontal (deformación). Además el origen es cambiado al punto de carga reversa más reciente. Este modelo es más eficiente que el bilineal, pues puede representar el efecto Bauschinger (cuando la curva esfuerzo – deformación bajo cargas alternadas deja de ser lineal a un esfuerzo mucho mas bajo que la resistencia inicial de cadencia) y el efecto de fluencia en secuencia de los miembros, una de sus desventajas sin embargo es la complejidad de la ley de histéresis.

El índice de disipación de energía histerética es expresado como:

$$E_h = \frac{2}{\pi} \left(1 - \frac{2\alpha}{\eta-1} \right) \left(1 - \frac{D_y F_m}{F_y D_m} \right) \dots\dots\dots(6)$$

El modelo puede disipar energía por histéresis incluso si el factor de ductilidad es menor que la unidad y la capacidad de disipación de energía se incrementa con un incremento del valor del exponente.

4.3 MODELO DEGRADANTE DE CLOUGHT

Este modelo es propuesto por Clough y Johnston, toma en cuenta el efecto de la degradación de la rigidez que se produce por las inversiones en el signo de la carga en los rangos inelásticos de un marco de concreto reforzado que fluye por flexión. La curva primaria es bilineal, es este modelo degradante la línea BC es paralela a la OA. A partir del punto C la rigidez cambia,

dirigiéndose hacia el punto de fluencia D (en la dirección negativa). La línea EF es paralela a la línea OD, pero cambia de pendiente en el punto F. Entonces la línea prosigue al punto B, el punto de inversión de la carga en el ciclo anterior. La respuesta del desplazamiento se incrementa al degradarse la rigidez o al reducirse la rigidez de la segunda ramificación de la curva esquelética. Este modelo es bastante simple y fue usado en el análisis inelástico. Puede ser considerado como el primer modelo que diferencia el comportamiento de estructuras de concreto armado con las de acero en un análisis dinámico. La degradación de la rigidez es expresada con la ecuación (2)

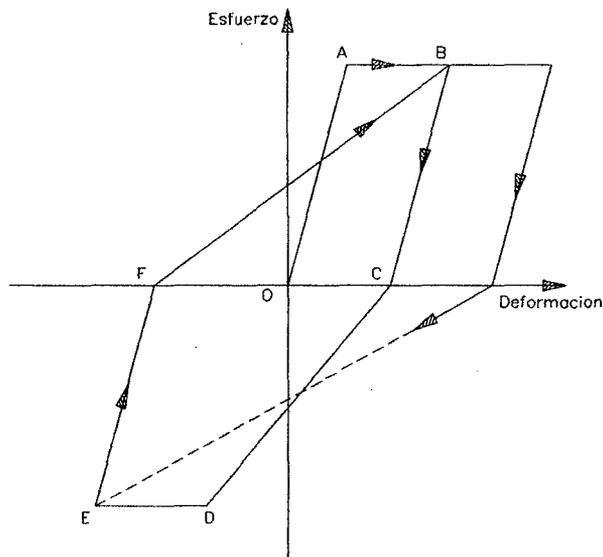


Fig.4.3 Modelo Degradante De Clough

El índice de disipación de energía histerética es expresado como:

$$E_h = \frac{1}{\pi} \left\{ 1 - (1 - \beta + \mu\beta) \mu^\alpha / \mu \right\} \dots\dots\dots(7)$$

Este modelo puede continuamente disipar energía histerética aún para pequeñas amplitudes de oscilaciones después de la fluencia.

4.4 MODELO DE TAKEDA

El modelo de Takeda usa una curva primaria trilineal, simétrica con relación al origen; incluye el cambio de rigidez en los puntos de agrietamiento y fluencia, así como la degradación de la rigidez con la deformación. La rigidez degradada de descarga se expresa como:

$$K_r = \frac{F_c + F_y}{D_c + D_y} \frac{D_m}{D_y}^{-\alpha} \dots(8)$$

En donde los subíndices “c” e “y” indican los niveles de agrietamiento y fluencia respectivamente.

4.5 MODELO TRILINEAL DEGRADENTE

Este modelo desarrollado en Japón, simula las características de rigidez a flexión de miembros de concreto armado. El cambio de rigidez primaria se da en los puntos de agrietamiento y fluencia. Una vez que la deformación excede el punto de fluencia el modelo se comporta como un modelo plástico perfecto. Durante la descarga, el punto de descarga es tratado como un “nuevo” punto de fluencia y las rigideces de descarga correspondientes a los puntos de pre y post agrietamiento se reducen proporcionalmente, de manera que el comportamiento tiene una forma bilineal en el rango comprendido entre los puntos de fluencia positivos y negativos. Este modelo tiene como característica la degradación continua de la rigidez con el incremento máximo del desplazamiento mas allá de la fluencia, otra característica es que la disipación de energía histerética es mayor en los primeros ciclos de carga después de la fluencia manteniéndose estables en los siguientes ciclos. El punto de agrietamiento de este modelo controla el ensanchamiento en la parte central de los ciclos de histéresis.

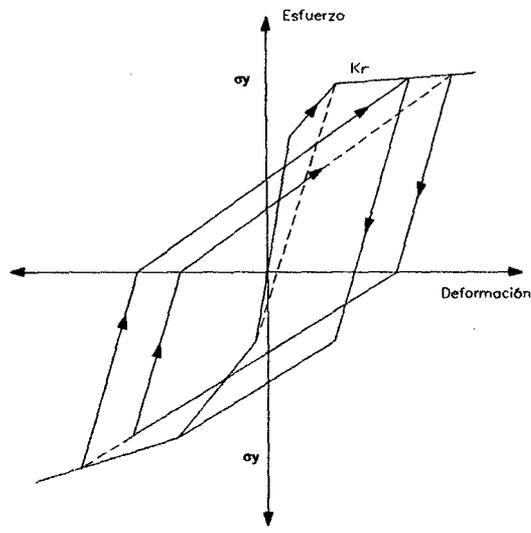


fig (a)

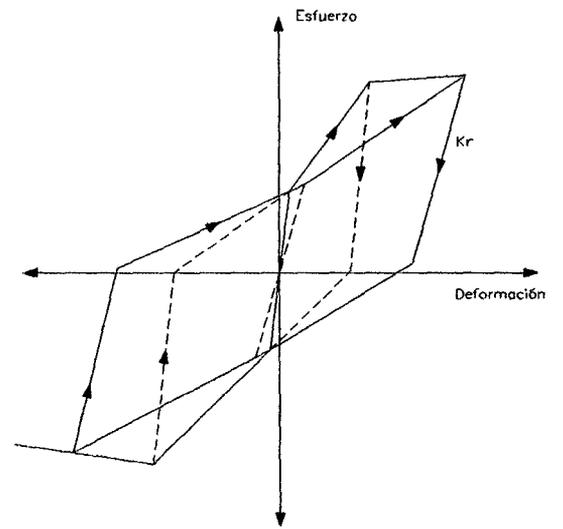


fig (b)

Fig.4.4 (a) Modelo de Takeda, (b) Modelo Trilineal Degradante

BIBLIOGRAFIA

1. Masayoshi Nakashima And Hiroto Kato; **CONTROL OF EXPERIMENTAL ERROR GROWTH IN PSEUDO DYNAMIC TESTING.**
2. Shin Okamoto, Yucata Tamazaki, Takanashi Kaminosono And Masaomi Teshigawara; **SEISMIC TEST OF FIVE STORY FULL SCALE REINFORCED MANSORY BUILDING.**
3. Koichi Takanashi And Masayoshi Nakashima. Report of the institute of Industrial Science the University of Tokio. Vol 32 N°3, Jun 1986; **JAPANESE ACTIVITIES ON ON-LINE COMPUTER TEST CONTROL METHOD**
4. Takashi Kaminosono, Yutaka Yamazaki, Hiroto Kato, Hiroshi Isoishi, Takaaki Nishi And Mototaka Matsuno. Joint Technical Coordinating Committee on Masonry Research. October 17 – 19 1988; **SEISMIC TEST OF FIVE STORY FULL SCALE REINFORCED MANSORY BUILDING.**
5. <http://peer.berkeley.edu/lab/> ; **EARTHQUAKE SIMULATOR LABORATORY UNIVERSITY OF CALIFORNIA, BERKELEY.**
6. P. Quast, M. K. Sain, B. F. Spencer Jr. Asce, & S. J. Dyke; **MICROCOMPUTER IMPLEMENTATION OF DIGITAL CONTROL STRATEGIES FOR STRUCTURAL RESPONSE REDUCTION.**
7. P. Negro, A. V. Pinto, G. Verzeletti and E. Magonett; **PSD TEST ON FOUR-STORY R/C BUILDING DESIGNED ACCORDING TO EUROCODES.**
8. Carlos Zavala T.; Graduate School of Engineering The University of Tokyo Dec. 1994; **A STUDY ON SUBSTRUCTURING; HYBRID SIMULATION FOR FLEXIBLE STELL FRAMED STRUCTURES.**
9. Vicente Chariarse C., Carlos Cuadra I., Carlos Zavala T; VIII Congreso Nacional de Ing. Civil; Piura-Peru, Marzo 1991; **TÉCNICAS PARA ENSAYOS A ESCALA NATURAL EN EL LABORATORIO DE ESTRUCTURAS DEL CISMID-FIC-UNI.**

10. Daniel Enrique Rios Padilla (1994); Tesis de Grado UNI-FIC; **“ESTUDIO EXPERIMENTAL DE PORTICOS DE CONCRETO ARMADO A ESCALA 3/4, SOMETIDOS A ENSAYOS DE SIMULACION SISMICA”**.
11. Patricia Gibu Yague, César Serida Morisaki (1993); Tesis de Grado UNI-FIC.; **“ENSAYOS REALIZADOS EN MUROS DE ALBAÑILERÍA CONFINADA”**
12. Graphical Programming For Instrumentation; National Instruments.(1998); **“CURSO BASICO DE LAB VIEW”**
13. Edward L. Wilson. **“THREE DIMENSIONAL DYNAMIC ANALYSIS OF STRUCTURES”**.
14. Convenio SENCICO-CISMID (2001). **“DESARROLLO DE UN SISTEMA CONSTRUCTIVO CON ESTRUCTURA DE PANELES PLEGADOS Y CERRAMIENTO DE MORTERO REFORZADO CON MALLA ELECTROSOLDADA”**