

INSTITUTO TECNOLÓGICO Y DE ESTUDIOS SUPERIORES DE MONTERREY

**CAMPUS MONTERREY
DIVISION DE INGENIERIA Y ARQUITECTURA
PROGRAMA DE GRADUADOS EN INGENIERIA**



**TECNOLÓGICO
DE MONTERREY.**

**ESTUDIO, SELECCION, IMPLEMENTACION Y APLICACION DE
EQUIPO DE LABORATORIO EN PROYECTOS CON COMPONENTE
EXPERIMENTAL**

TESIS

**PRESENTADA COMO REQUISITO PARCIAL PARA OBTENER
EL GRADO ACADEMICO DE**

**MAESTRO EN CIENCIAS
EN INGENIERIA Y ADMINISTRACION DE LA CONSTRUCCION
ESPECIALIDAD EN INGENIERIA ESTRUCTURAL**

POR:

JOSE FRANCISCO LOPEZ GUZMAN

MONTERREY, N. L.

FEBRERO 2006

INSTITUTO TECNOLÓGICO Y DE ESTUDIOS SUPERIORES DE MONTERREY

**CAMPUS MONTERREY
DIVISION DE INGENIERIA Y ARQUITECTURA
PROGRAMA DE GRADUADOS EN INGENIERIA**



**TECNOLÓGICO
DE MONTERREY.®**

**ESTUDIO, SELECCION, IMPLEMENTACION Y APLICACION DE
EQUIPO DE LABORATORIO EN PROYECTOS CON COMPONENTE
EXPERIMENTAL**

T E S I S

**PRESENTADA COMO REQUISITO PARCIAL PARA OBTENER
EL GRADO ACADEMICO DE**

**MAESTRO EN CIENCIAS
EN INGENIERIA Y ADMINISTRACION DE LA CONSTRUCCION
ESPECIALIDAD EN INGENIERIA ESTRUCTURAL**

POR:

JOSE FRANCISCO LOPEZ GUZMAN

MONTERREY, N. L.

FEBRERO 2006

Gracias

A mis padres, por su amor, ejemplo y apoyo incondicional.

A mis hermanos, por su cariño y apoyo.

A mis abuelitos y a mi abuela, por su inolvidable cariño.

A mis familiares, por su cariño y confianza.

A mis amigos, por los momentos compartidos.

A mis maestros, por sus consejos y enseñanzas.

José Francisco

TABLA DE CONTENIDOS

	Hoja
CAPÍTULO 1 Introducción y objetivos	
1.1 Generalidades	1
1.2 Justificación	2
1.3 Línea de investigación	2
1.4 Objetivo general	3
1.5 Objetivos específicos	3
CAPÍTULO 2 Revisión de literatura	
2.1 Introducción	4
2.2 Acciones	4
2.3 Respuesta y estados límite de la estructura	6
2.4 Resistencia	8
2.5 Diseño por medio de modelos	8
2.6 Instrumentación. Principios y aplicaciones	9
2.6.1 Magnitudes sujetas a medición	9
2.7 Transductores	11
2.8 Medición de la deformación	11
2.8.1 Galga extensométrica	12
2.8.2 Puente de Wheatstone	13
2.8.3 Cementación de galgas	16
2.8.4 Selección de galgas	29
2.9 Medición del desplazamiento	31
2.9.1 Reloj comparador	31
2.9.2 Transductor Lineal Diferencial Variable (LVDT)	33
2.10 Medición de la carga	36
2.10.1 Celda de carga	36
2.11 Medición de la presión	38
2.11.1 Transductores de presión	38
2.12 Medición de la aceleración	41
2.12.1 Acelerómetro	41
2.13 Medición de la temperatura	43
2.13.1 Termopar	43
2.14 Centro de adquisición de datos	45
2.15 Instrumentación virtual	46
2.15.1 Labview	47
2.16 Investigación sobre la instrumentación del distribuidor vial San Antonio	49
2.17 Listado de algunas estructuras instrumentadas	52
CAPÍTULO 3 Diseño de experimentos.	
3.1 Introducción	54
3.2 Evaluación analítica y experimental de un domo a escala 1:06 construido en mesa vibratoria en los laboratorios de Texas A&M	54
3.2.1 Instrumentación del proyecto	55
3.3 Evaluación analítica y experimental de un domo a escala construido en los laboratorios del ITESM, sujeto a carga gravitacional	63
3.3.1 Instrumentación del proyecto	65
3.4 Estudio de costo-beneficio para los diferentes tipos de refuerzo empleados en vivienda a base de adobe	73
3.4.1 Instrumentación del proyecto	74

	Hoja
CAPÍTULO 4 Resultados de las pruebas.	
4.1 Evaluación analítica y experimental de un domo a escala 1:06 construido en mesa vibratoria en los laboratorios de Texas A&M	79
4.2 Evaluación analítica y experimental de un domo a escala construido en los laboratorios del ITESM, sujeto a carga gravitacional	84
4.3 Estudio de costo-beneficio para los diferentes tipos de refuerzo emplados en vivienda a base de adobe	86
CAPÍTULO 5 Conclusiones.	
5.1 Conclusiones	87
5.2 Recomendaciones	88
CAPÍTULO 6 Bibliografía.	89
CAPÍTULO 7 Anexos.	
Anexo 1 Tabla de tipos de galgas. Descripción, aplicación y características	92
Anexo 2 Lista de material y equipo que se requiere para cementar una galga	93
Anexo 3 Manual básico para la utilización de LabVIEW	94

CAPÍTULO 1 Introducción y Objetivos

1.1 Generalidades

Varios de los conocimientos de la Ingeniería Civil tienen su base en la experimentación, no se pueden entender las actuales leyes, principios y teorías sin pruebas que las fundamenten. Es así como la evaluación experimental es una pieza fundamental en el desarrollo de nuevas propuestas y modelos. Sin un buen conocimiento de los equipos de medición y control modernos no es posible llevar a cabo pruebas que validen las nuevas propuestas. Dada la importancia de los equipos de medición y control, es necesario desarrollar un conocimiento preciso de los mismos.

La tecnología ha ido progresando de los antiguos sistemas neumáticos y electromecánicos para medición y control, hasta los modernos sistemas de sensores integrados basados en electrónica analógica, y los controladores para procesamiento y despliegue de información. Inventos como el transistor, el amplificador, la interfaz de computadora con un sistema de adquisición de datos y ahora los transductores integrados con software especializado definen la dirección y la rapidez con que han cambiado los sistemas de instrumentación.

Actualmente son diversas las aplicaciones que se dan a los sistemas de adquisición de datos. Se tienen aplicaciones dentro del control de procesos, la instrumentación y medición industrial, comercios, residencias, hospitales, en la medición de consumos, abastecimientos y distribuciones de energía eléctrica, mediciones en sistemas de transportación, aviones, trenes y embarcaciones, la administración de sistemas de comunicaciones, instrumentación en sistemas de telefonía, microondas y redes computacionales, instrumentación sismológica, instrumentación climatológica y un sinnúmero de aplicaciones diversas (NI, 2005). En la Ingeniería Civil las aplicaciones de la instrumentación se centran en la adquisición de variables de interés durante el desarrollo de pruebas experimentales.

Para explicar el empleo y la aplicación de los instrumentos de medición se cuenta con instructivos y manuales que resultan poco ilustrativos para montar pruebas experimentales y conocer el funcionamiento y empleo adecuado de los equipos de medición. Los conocimientos plasmados en los libros sobre instrumentación son abstractos y de igual forma dificultan la comprensión del funcionamiento y aplicación de los instrumentos. Son pocos los documentos que ilustran el montaje y funcionamiento práctico de los equipos y que describen de una manera comprensible las características de interés para la adecuada selección de la instrumentación. En la Ingeniería Civil se requiere un mayor desarrollo en la rama de la instrumentación, por lo que el desarrollo de conocimientos y su correcta documentación es vital.

Por otro lado, para mitigar los daños de las estructuras ante fenómenos como sismo y viento, se han realizado diversos estudios de estructuras novedosas y de materiales alternos. Proyectos como el *Tecnodomo* o los relativos a la caracterización de las propiedades del

bambú, papelcreto y concreto celular, entre otros desarrollados en el Centro de Diseño y Construcción del ITESM, son ejemplo de lo anterior. Los estudios realizados generalmente consideran una componente experimental, por lo que la importancia de instrumentar estructuras y modelos de una forma eficiente es evidente.

1.2 Justificación

El Centro de Diseño y Construcción (CDC) del Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de Monterrey (ITESM) desarrolla constantemente proyectos con una componente experimental apreciable. Con la intención de desarrollar experimentos detallados se pretende adquirir instrumentación acorde a las necesidades de las pruebas. Dentro de este entorno se encuentra la presente investigación, encargada de apoyar a los proyectos del CDC, entre los cuales se encuentran: *Evaluación analítica y experimental de un domo a escala 1:0.6 construido en mesa vibratoria en los laboratorios de Texas A&M* y *Evaluación analítica y experimental de un domo a escala construido en los laboratorios del ITESM, sujeto a carga gravitacional*.

El impacto de esta investigación para los proyectos mencionados se relaciona directamente con la selección y compra del equipo necesario, posterior al estudio de las características de cada proyecto y el diseño de su experimentación. El funcionamiento del equipo es vital para el buen desarrollo de los proyectos, por lo que esta investigación se encargará también de evaluar los equipos y documentar las características de los mismos. El apoyo dentro de la experimentación de los proyectos es la parte práctica del trabajo.

No menos importante es la buena documentación de la investigación. Un impacto crucial dentro de los futuros proyectos a desarrollarse en el CDC es la adecuada divulgación y enseñanza de los conocimientos adquiridos. Parte fundamental del proyecto es la correcta presentación de lo aprendido por medio de manuales, fichas, fotografías y demás medios útiles para poder preservar los conocimientos. El resultado de lo anterior, además de impactar a los proyectos de investigación, beneficiará al Laboratorio de Estructuras de la División de Ingeniería y Arquitectura del ITESM al aportar conocimientos nuevos en el área de instrumentación, útiles para la mejora de las prácticas que en él se imparten.

Por lo expuesto anteriormente se aprecia que la presente investigación es necesaria para que el CDC siga desarrollando innovadores proyectos con experimentación acorde a los equipos de instrumentación y control más modernos, permitiendo que el ITESM siga a la vanguardia y continúe aportando proyectos en beneficio de la sociedad.

1.3 Línea de investigación

Este trabajo se lleva a cabo como parte del programa de posgrados de la División de Ingeniería y Arquitectura, en la Maestría en Administración de la Construcción con especialidad en Estructuras, como parte de las actividades de la cátedra de vivienda, así como la línea de investigación en componentes estructurales.

1.4 Objetivo general

El objetivo general de este trabajo consiste en el estudio, selección e implementación de equipo en proyectos con componente experimental; así como la aplicación de dicho equipo. Adicionalmente dar apoyo a diversos proyectos, entre los cuales se encuentran: *Evaluación analítica y experimental de un domo a escala 1:0.6 construido en mesa vibratoria en los laboratorios de Texas A&M y Evaluación analítica y experimental de un domo a escala construido en los laboratorios del ITESM, sujeto a carga gravitacional.*

La documentación del trabajo realizado es un objetivo importante, por lo que se deben establecer procesos para conservar el conocimiento adquirido en forma de manuales, fichas técnicas, fotos y demás medios útiles con el fin de preservar la información para su consulta por parte de futuros investigadores y contribuir en la formación de los alumnos que cursan el laboratorio de estructuras.

Se pretende fomentar el trabajo en equipo y sentar un precedente en los proyectos de investigación desarrollados en el ITESM al crear un área responsable del estudio, la adquisición y administración del equipo. Se busca contar con expertos en instrumentación que puedan implementar y aplicar el equipo de medición en los diferentes proyectos de investigación.

1.5 Objetivos específicos

Los objetivos específicos que persiguen durante el desarrollo de este trabajo son los siguientes:

- Revisión de literatura.
- Identificar el equipo necesario para cada proyecto.
- Búsqueda de equipo relacionado con los proyectos.
- Contacto con diferentes proveedores.
- Selección del equipo necesario.
- Administración del equipo.
- Elaboración de guías y manuales necesarios.
- Conocimiento del nuevo sistema de adquisición de datos.
- Aprender y colaborar en la enseñanza del programa LabVIEW.
- Enseñanza del funcionamiento de los equipos.

CAPÍTULO 2 Revisión de literatura

2.1 Introducción

Este capítulo involucra los aspectos teóricos de la instrumentación empleada en proyectos de investigación con componente experimental. Para comprender los diferentes parámetros que se requieren medir en los modelos estructurales, se mencionan las acciones y la respuesta de la estructura ante las mismas. Se presentan el concepto del transductor y la instrumentación requerida para medir las variables más importantes en pruebas experimentales. Se describe el funcionamiento de cada equipo y aspectos importantes para operarlos de una forma adecuada.

La finalidad de este capítulo es mostrar la información que permita comprender el equipo de instrumentación que más se emplea, así como el más novedoso (instrumentación virtual). Para entender el empleo del equipo se muestran figuras ilustrativas y detalles de selección y funcionamiento; así como un ejemplo de aplicación en un proyecto real al final del capítulo.

2.2 Acciones

Por acciones se entiende a las cargas, incluyendo a todos los agentes externos que inducen en la estructura fuerzas internas, esfuerzos y deformaciones. Además de las cargas, se incluyen las deformaciones impuestas como los hundimientos de la cimentación y los cambios volumétricos, así como los efectos ambientales de viento, temperatura y vibraciones.

Con el fin de conocer el comportamiento de una estructura sometida a diversas acciones, en las Normas Técnicas Complementarias sobre criterios y acciones para el diseño estructural de las edificaciones, se consideran tres categorías de acciones de acuerdo con la duración en que obran sobre las estructuras con su intensidad máxima:

a) Las acciones permanentes son las que obran en forma continua sobre la estructura y cuya intensidad varía poco con el tiempo. Las principales acciones que pertenecen a esta categoría son: la carga muerta; el empuje estático de suelos y de líquidos y las deformaciones y desplazamientos impuestos a la estructura que varían poco con el tiempo, como los debidos a presfuerzo o a movimientos diferenciales permanentes de los apoyos;*

b) Las acciones variables son las que obran sobre la estructura con una intensidad que varía significativamente con el tiempo. Las principales acciones que entran en esta categoría son: la carga viva; los efectos de temperatura; las deformaciones impuestas y los hundimientos diferenciales que tengan una intensidad variable con el tiempo, y las acciones debidas al funcionamiento de maquinaria y equipo, incluyendo los efectos dinámicos que pueden presentarse debido a vibraciones, impacto o frenado; y

* Sin considerar los desplazamientos inmediatos a la aplicación del presfuerzo.

c) *Las acciones accidentales son las que no se deben al funcionamiento normal de la edificación y que pueden alcanzar intensidades significativas sólo durante lapsos breves. Pertenecen a esta categoría: las acciones sísmicas; los efectos del viento; las cargas de granizo; los efectos de explosiones, incendios y otros fenómenos que pueden presentarse en casos extraordinarios. Será necesario tomar precauciones en las estructuras, en su cimentación y en los detalles constructivos, para evitar un comportamiento catastrófico de la estructura para el caso de que ocurran estas acciones.*

Los tres tipos de acciones varían con el tiempo, aun las cargas permanentes. Por ejemplo, la carga muerta varía con respecto al tiempo debido a los cambios de humedad y al desgaste de los materiales por uso o intemperismo. En forma esquemática la variación de la carga muerta con el tiempo se presenta en la figura 1.

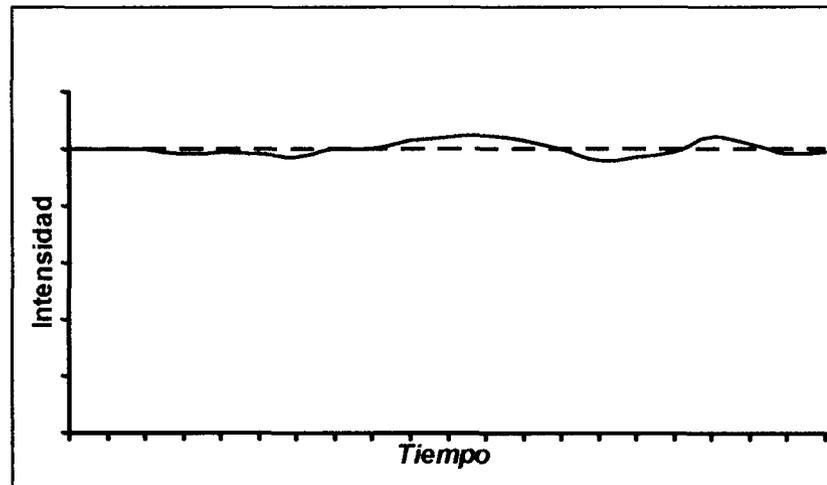


Figura 1. Variación de la carga muerta con el tiempo (Modificada de Meli, 2001).

Para el caso de carga viva, las cargas variables modifican su intensidad de manera apreciable con el tiempo, debido a que está compuesta por una parte semipermanente correspondiente al peso de muebles y equipo, y por otra porción debida al peso de personas y equipo móvil, que tiene variaciones continuas y significativas. Por ejemplo, la variación de la carga viva respecto al tiempo que puede representarse con la figura 2.

La variabilidad de las acciones accidentales con el tiempo se representa por picos en lapsos muy cortos y espaciados, que indican la intensidad de la acción, como se muestra en la figura 3.

Esta variabilidad de las acciones con el tiempo es importante para definir la forma en que debe superponerse el efecto de cada una al considerar la acción combinada de un conjunto de cargas. Los reglamentos especifican valores de diseño que son conservadores, es decir, que tienen una probabilidad pequeña de ser excedidos.

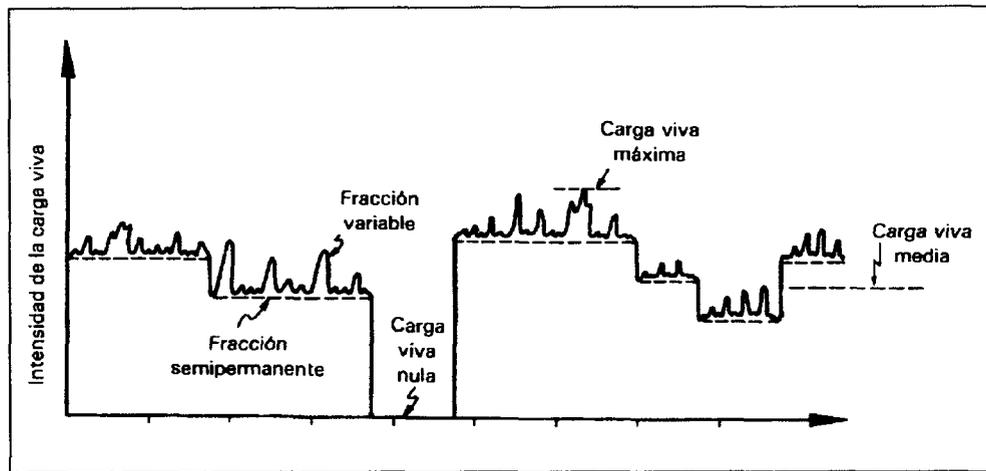


Figura 2. Variación de la carga viva respecto al tiempo (Meli, 2001).

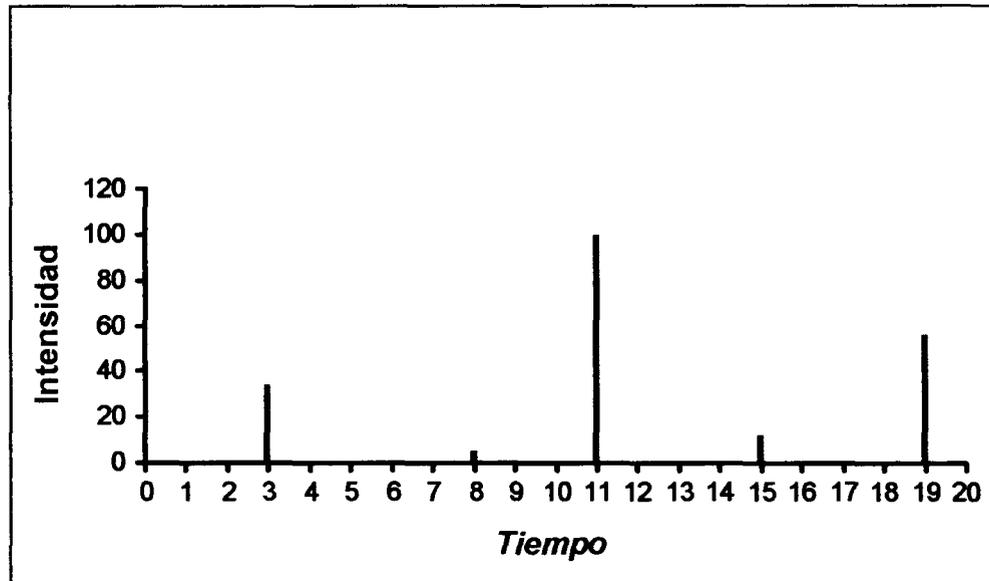


Figura 3. Variación de las acciones accidentales con el tiempo (Modificada de Meli, 2001).

Se conoce como combinación de acciones de diseño al conjunto de acciones para cuyo efecto superpuesto debe revisarse la seguridad de la estructura. Estas combinaciones pueden clasificarse en comunes y excepcionales; las comunes son aquellas que incluyen exclusivamente acciones permanentes y variables, mientras que las excepcionales son las que incluyen alguna acción accidental.

2.3 Respuesta y estados límite de la estructura

En la figura 4 se aprecia que la respuesta de la estructura está representada por el conjunto de parámetros físicos que describen su comportamiento ante las acciones que le son aplicadas. Es necesario que la respuesta de la estructura se mantenga dentro de los límites que no afecten su correcto funcionamiento, ni su estabilidad. Los límites admisibles de la

respuesta estructural dependen del tipo de construcción y de su destino y están definidos para las estructuras más comunes en los códigos de diseño.

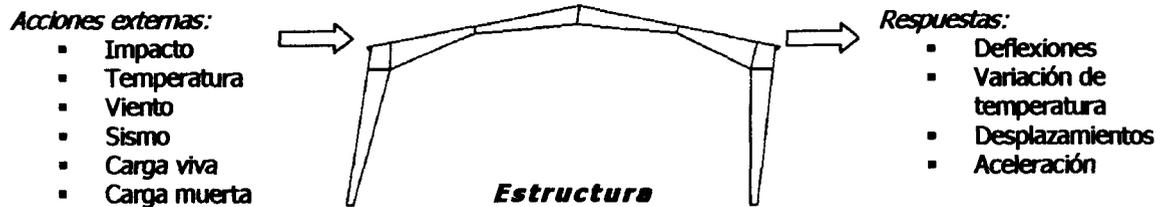


Figura 4. Acciones y respuestas en una estructura.

Se llama estado límite de una estructura a cualquier etapa de su comportamiento a partir del cual su respuesta se considera inaceptable. Se tienen dos tipos de estados límite:

- a) Estado límite de falla: es aquel relacionado con la seguridad y corresponde a situaciones en las que la estructura sufre una falla total o parcial, o simplemente presenta daños que afectan su capacidad para resistir nuevas acciones, es decir, cualquier situación que corresponda al agotamiento de la capacidad de carga de la estructura o de cualquiera de sus componentes, o al hecho de que ocurran daños irreversibles que afecten significativamente la resistencia ante nuevas aplicaciones de carga. La falla de una sección por cortante, flexión, torsión, carga axial o cualquier combinación de esos efectos; constituyen un estado límite de falla, así como la inestabilidad o falta de equilibrio global de la estructura, el pandeo de uno de sus miembros y el pandeo local de una sección.
- b) Estado límite de servicio: se relaciona con aquellas situaciones que, aún sin poner en riesgo la seguridad de la estructura, afectan el correcto funcionamiento de la construcción, pero no perjudican su capacidad para soportar cargas. Estas situaciones comprenden los desplazamientos, deflexiones, agrietamientos, temperatura excesiva y vibraciones; así como el daño en elementos no estructurales de la estructura.

Los requisitos de servicio se relacionan principalmente con la rigidez de la estructura y de sus miembros; de ella dependen principalmente los movimientos, desplazamientos, vibraciones, que constituyen los aspectos de la respuesta que afectan frecuentemente el correcto funcionamiento de la estructura.

Para revisar si ante un conjunto dado de acciones se rebasa algún estado límite, se necesita contar con procedimientos que permitan relacionar la acción con la respuesta y contar con criterios para determinar qué niveles de respuesta constituyen un estado límite. La relación entre acción y respuesta se establece por medio de procedimientos de análisis estructural o mediante una evaluación experimental que determinen la distribución de fuerzas internas, deflexiones y deformaciones que se inducen en la estructura.

De igual forma, es necesario definir un índice de respuesta que pueda compararse con la acción o combinación de acciones que afectan la estructura para definir si la respuesta de la estructura es adecuada en cuanto a la aparición de algún estado límite.

2.4 Resistencia

Se define como resistencia de una estructura a la intensidad de la acción o combinación de acciones que conducen a la misma a un estado límite de falla. En el caso usual en que la revisión de la seguridad se hace por medios analíticos, conviene realizar la comparación a nivel de fuerzas internas, determinando por un análisis estructural las fuerzas axiales y cortantes, los momentos de flexión y torsión, así como la combinación de efectos (vigas-columnas o travesaños armados, por ejemplo) y compararlos con los valores de estas fuerzas internas que la estructura, o cada sección de ella, es capaz de resistir.

La resistencia de un elemento estructural se determina por métodos experimentales o analíticos en función de las propiedades mecánicas de los materiales y geométricas de la estructura.

2.5 Diseño por medio de modelos

Una manera empírica para diseñar una estructura consiste en hacer un modelo a escala natural y comprobar si es satisfactorio su comportamiento bajo combinaciones de solicitaciones que reproduzcan aquellas a las que se supone estará sujeto el prototipo. Este procedimiento es el que probablemente se utilizó en el diseño de muchas de las estructuras de la antigüedad. La experiencia de generaciones sucesivas permitió ir desarrollando procesos de diseño, en su mayoría empíricos. Incluso hoy en día las características dimensionales de muchos de los sistemas constructivos tradicionales están basadas en estos criterios empíricos sobre el comportamiento de prototipos a escala natural.

El uso de modelos es a veces el método más indicado para conocer el comportamiento de estructuras complejas que no son fáciles de analizar por medio de los modelos matemáticos usuales. Mientras que los modelos matemáticos reproducen los fenómenos físicos reales tan solo de una manera aproximada, la información que se puede obtener de ensayos a escala natural es la más fidedigna posible. Evidentemente las desventajas principales del método son su costo y el tiempo necesario para obtener resultados.

El alto costo implicado en el diseño por medio de modelos puede disminuirse si estos se hacen a una escala reducida. El comportamiento del prototipo puede deducirse del comportamiento del modelo, teniendo en cuenta los principios de similitud que establece la teoría de modelos. Las solicitaciones aplicadas al modelo deben reproducir a escala las solicitaciones a las que vaya a quedar sujeta la estructura real. En algunos casos los modelos se fabrican de materiales iguales a los del prototipo, pero pueden emplearse materiales distintos siempre que sea posible diseñar el modelo de manera que su comportamiento sea equivalente al del prototipo. El empleo de modelos a escala, sobre todo cuando los materiales son diferentes puede introducir incertidumbres que no existen en los modelos a escala natural.

Para el estudio de estructuras por medio de modelos, se aplican conjuntos de solicitaciones exteriores, representativas de aquellas a las que el prototipo estará sujeto en la realidad y se miden las respuestas del mismo. Para satisfacer la condición de seguridad, el modelo debe resistir dichas solicitaciones, mientras que para satisfacer la condición de comportamiento satisfactorio, las respuestas del modelo a las solicitaciones deberán estar comprendidas entre los valores considerados como límites admisibles. Si una de estas condiciones no se satisface, se modifican las características del modelo y se repite el proceso. La experimentación con modelos físicos complementa los modelos matemáticos proporcionados por la mecánica de materiales.

2.6 Instrumentación. Principios y aplicaciones.

Ya se ha planteado la importancia de la experimentación con modelos físicos. Parte fundamental para que ésta sea efectiva y no se presenten errores es la instrumentación empleada. El proceso que habitualmente se presenta al instrumentar una prueba experimental es el siguiente:

- ↳ Identificar las magnitudes que se van a medir
- ↳ Seleccionar el equipo y los sensores adecuados
- ↳ Instalar los sensores en los especímenes que se van a ensayar
- ↳ Calibrar los sensores y revisar el equipo antes de iniciar la prueba
- ↳ Adquirir los datos

Este proceso puede ser complejo, sobretodo si se trabaja con equipo muy sofisticado que involucre variables como temperatura, alta presión o respuesta dinámica. De hecho, la instrumentación puede ser la componente que consume la mayor cantidad de tiempo y una buena parte del presupuesto en algunos proyectos con componente experimental. Es preciso conocer todo lo referente a la evaluación de parámetros, pero igual es muy importante realizar el análisis de los modelos con el fin de obtener una cantidad de mediciones realistas y suficientes que no encarezcan los proyectos y permitan una adquisición de datos precisa.

2.6.1 Magnitudes sujetas a medición

El comportamiento de una estructura se refleja en los esfuerzos, deformaciones unitarias, desplazamientos, deflexiones, temperatura y demás respuestas que presenta esta ante las diversas combinaciones de carga a las que puede estar sujeta. Las acciones actuantes y las respuestas generadas en la estructura pueden ser medidas mediante la instrumentación adecuada de la misma. Esta instrumentación se puede colocar en la superficie, en los extremos, en los puntos de aplicación de carga e incluso dentro de la misma estructura.

Generalmente, en una estructura o su correspondiente modelo, se requiere medir las siguientes magnitudes:

A) Deformación unitaria. Puede ser que se requiera medir su distribución sobre una superficie o simplemente su valor en un punto en específico. Dependiendo del material donde se instrumente, se puede embeber el sensor o se puede pegar en la superficie. Si se conoce la

relación esfuerzo-deformación del material, los esfuerzos asociados a las deformaciones en la estructura pueden ser determinados

B) Deflexión. Puede medirse su distribución a lo largo de la estructura y su variación al aplicar carga o su valor en un punto específico o un elemento constitutivo. Las mediciones de deflexión son necesarias para definir las características de carga-deformación y pueden ser útiles para determinar los límites del comportamiento elástico, la curvatura y los cambios de curvatura. (Harris et al, 1999)

C) Agrietamiento. En el caso de estructuras de concreto sujetas a carga, es de interés conocer la ubicación, patrones y ancho de las grietas que se generan. Esta información se emplea para determinar los límites de cargas de servicio.

D) Fuerzas. Medir esta magnitud es muy importante, pues representa, en la mayoría de los casos, la acción a la que están sometidas las estructuras y los especímenes. Podemos medir las fuerzas en las reacciones o en los puntos de aplicación de la carga. En la figura 2.1 se puede apreciar una viga de concreto a la que se aplica una carga y donde es de interés conocer la magnitud de la fuerza aplicada además de la deflexión al centro del claro y el patrón de agrietamiento.

E) Temperatura. En ciertos proyectos es importante conocer la temperatura dentro de una estructura sujeta a diferentes condiciones de temperatura a lo largo de cierto intervalo de tiempo.

F) Comportamiento de materiales. Es importante determinar el comportamiento para poder trabajar con otras mediciones (como las deformaciones) y poder determinar el comportamiento general de una estructura formada por el material en estudio. Estas propiedades son de gran interés sobre todo para la caracterización de materiales alternos sujetos a pruebas de carga, absorción y temperatura. Entre estas propiedades se pueden incluir los efectos de contracción y flujo plástico en estructuras de concreto sujetas a cargas sostenidas.

G) Aceleraciones. Se puede sujetar una estructura a diversas cargas dinámicas como: impacto, sismo, viento y cargas cíclicas. Las respuestas que pueden medirse son las aceleraciones, velocidades y desplazamientos.

En la mayoría de las pruebas realizadas en laboratorio, las magnitudes de mayor interés son la deformación unitaria, las deflexiones, la fuerza y las aceleraciones. (Harris et al, 1999) Los equipos para medir estas magnitudes pueden ser desde simples sensores hasta sofisticados aparatos electrónicos.

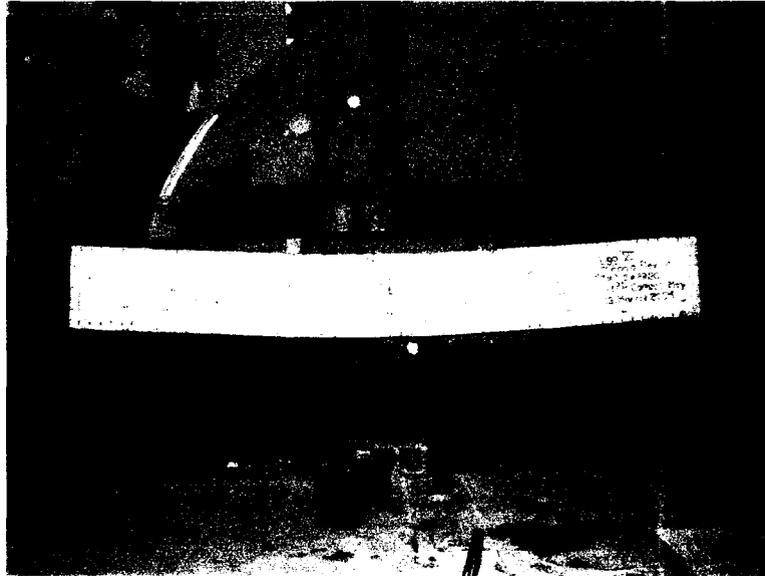


Figura 5. Evaluación de parámetros de fuerza, deflexión y agrietamiento

2.7 Transductores

Para entender el funcionamiento de los equipos de medición, es necesario conocer el concepto de transductor. Un transductor es todo aquel dispositivo que convierte una señal de entrada en una señal correspondiente proporcional. Existen seis tipos de señales: mecánicas, térmicas, magnéticas, eléctricas, ópticas y químicas. En estricto sentido, cualquier dispositivo que convierta una señal de un tipo en una señal de otro tipo debería considerarse un transductor, y la señal de salida (la que se va a interpretar) podría ser útil en cualquier forma física. En la práctica, sin embargo, se conoce solamente como transductores a aquellos que ofrecen una señal de salida eléctrica. Esto se debe a que la señal eléctrica es más fácil de interpretar en la mayoría de los procesos de medición (Wilson, 1993).

Existen dos tipos de transductores: pasivos y activos. Los transductores pasivos no requieren una fuente de alimentación externa y envían directamente la señal que generan al centro de adquisición de datos; pero, ya que la señal es muy pequeña, estos transductores requieren de una amplificación de la señal. Los transductores activos incluyen circuitos internos para generar una señal de voltaje amplificada, pero requieren de una fuente constante de alimentación externa.

2.8 Medición de deformación

La Mecánica de Materiales proporciona una serie de ecuaciones que permiten obtener el estado de esfuerzos de un elemento estructural que trabaja en uno o dos de sus ejes; así mismo, se cuenta con ecuaciones que permiten estimar el estado de esfuerzos a partir de los valores de deformación en esos ejes. Resulta evidente entonces que al contar con una lectura confiable del estado de deformación elástico, es posible saber a qué valores de esfuerzo trabaja ese elemento. Por lo tanto, una lectura confiable de la deformación permitiría comprobar si los valores del cálculo estructural corresponden a los obtenidos

experimentalmente, con lo que se evita el riesgo de subdimensionamiento o sobredimensionamiento de esos elementos estructurales y por otro lado, permite verificar el grado de aproximación de los cálculos.

Pero no solo es posible obtener esfuerzos con transductores de deformación, ya que al ser herramientas que transforman los cambios de resistencia eléctrica a deformación unitaria, es posible, mediante las ecuaciones y conversiones adecuadas, leer parámetros tales como fuerza, presión, desplazamiento, temperatura, aceleración, par torsor, dilatación térmica, y otros muchos que se pueden obtener con relativa facilidad y economía; razón por la cual es aplicada en todos los desarrollos de la ingeniería moderna. (Wilson, 1993)

2.8.1 Galga Extensométrica

Ya se mencionó que todos los métodos de análisis experimental de esfuerzos se basan en la deformación del elemento para la determinación del esfuerzo al que trabaja. Las galgas extensométricas son una herramienta útil para los métodos de análisis experimental, pues su principio de operación se basa en los cambios de resistencia eléctrica que sufre un conductor, cuando es sometido a cambios en su longitud.

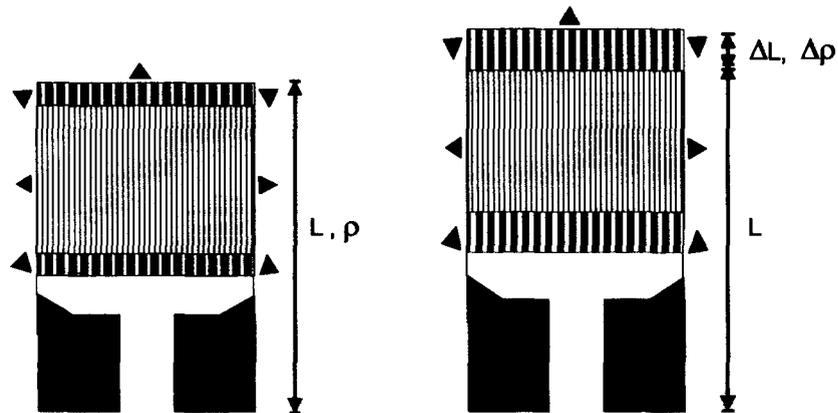


Figura 6. Esquematación gráfica del principio básico de una galga (Yeomans et al, 1998).

Es importante recordar que la resistencia eléctrica de cualquier conductor, depende del material de que se trate y de sus dimensiones, y viene dada por la siguiente ecuación:

$$R = \frac{\rho L}{A}$$

En donde R es la resistencia eléctrica [ohms], L es la longitud [m], A es el área transversal del conductor [m²] y ρ la resistividad $\left[\frac{\text{ohms} \times \text{m}^2}{\text{m}} \right]$.

Por otro lado, se sabe que la resistencia eléctrica de un conductor sujeto a esfuerzo cambia proporcionalmente a la deformación que éste sufre, lo cual se expresa de la siguiente forma:

$$\frac{\Delta R}{R} = F_G \times \frac{\Delta L}{L}$$

En donde R y L son la resistencia eléctrica y la longitud que ya se mencionaron y F_G es el factor de galga, el cual es una constante característica de cada galga que determina su sensibilidad y es función de la aleación empleada en su fabricación.

Es posible obtener la deformación unitaria de un elemento estructural ($\Delta L/L = \epsilon$) si de alguna forma se instala un elemento conductor firmemente adherido a él y se mide su cambio de resistencia eléctrica. En la figura 7(a) se aprecia precisamente lo que es una galga extensométrica; un fino conductor, con una resistencia y un factor de galga conocidos, y montado sobre una delgada capa de material de soporte que le permiten ser pegado fácil y firmemente a cualquier elemento estructural. Existen galgas de diferentes tamaños y formas, lo que posibilita su instalación en prácticamente cualquier punto y medir con muy alta precisión su variación de resistencia (ΔR) y con ello la deformación unitaria (ϵ) bajo las más variadas condiciones de cargas y ambientes. En el anexo 1 se presenta una tabla de los tipos de galga existentes, con su descripción, aplicación y características.

Usualmente se emplea una sola galga para medir la deformación unitaria en una dirección. A las galgas, como la de la figura 7(a) que trabajan en una sola dirección se les conoce como galgas uniaxiales. En pruebas experimentales donde se requiere determinar dos o tres componentes independientes de esfuerzo plano, se requieren tres mediciones diferentes de deformación y para realizar este trabajo es posible adquirir galgas en configuración de roseta, como la triaxial que se ilustra en la figura 7(b).

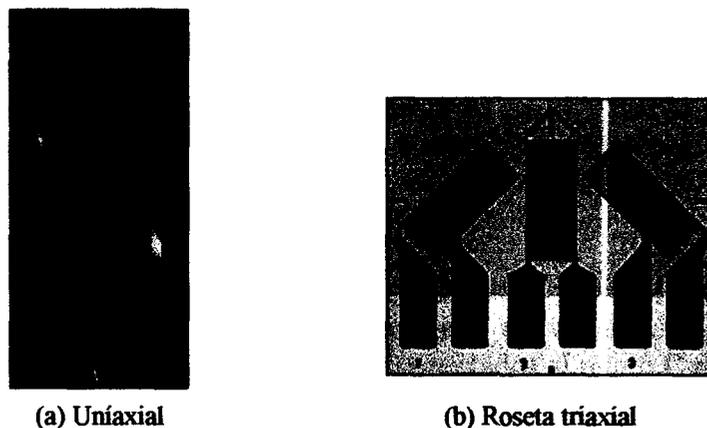


Figura 7. Galgas extensométricas (Vishay, 2005).

2.8.2 Puente de Wheatstone

Se ha comentado la factibilidad de obtener la deformación unitaria (ϵ) a partir de la variación de resistencia (ΔR); ahora el problema radica en medir ΔR , para lo cual se emplea el puente de Wheatstone. En la figura 8 se muestra un arreglo de cuatro resistencias eléctricas R_1 , R_2 , R_3 y R_4 que son alimentadas por la batería F en los puntos A y B. Se aprecia que las resistencias R_1 y R_2 trabajan con voltaje positivo, mientras que las resistencias R_3 y R_4

trabajan con voltaje negativo. Junto con el arreglo de resistencias, entre los puntos C y D se coloca un galvanómetro que permite medir la intensidad y dirección de la corriente eléctrica que circula entre los puntos C y D cuando exista una diferencia de potencial entre ellos. Al dispositivo descrito se le conoce con el nombre de puente de Wheatstone.

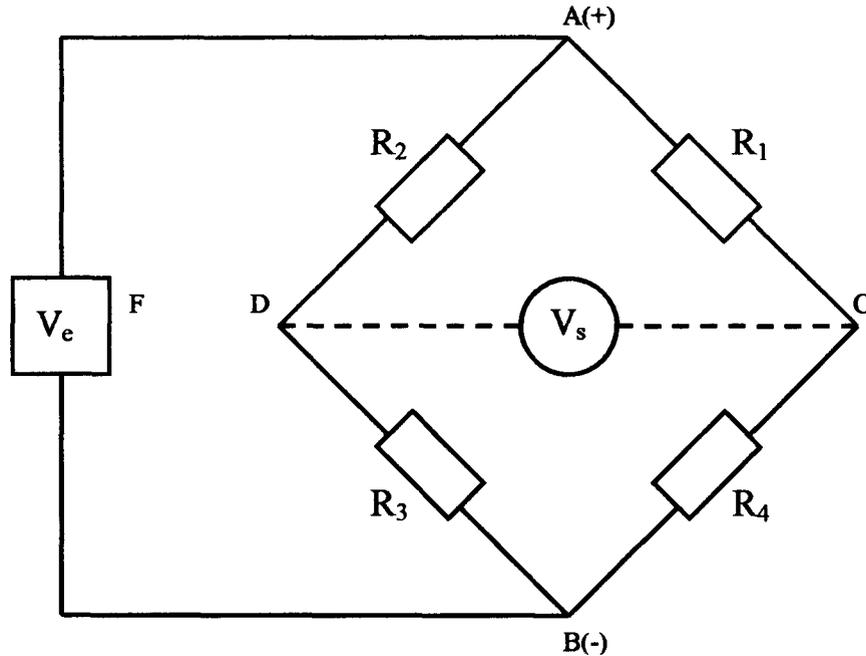


Figura 8. Puente de Wheatstone.

Tras describir los componentes de este dispositivo, es más fácil comprender su funcionamiento. Si se cambia el valor de la resistencia R_1 (lo cual podría ser el caso de una galga colocada sobre un elemento estructural sometido a esfuerzo), el galvanómetro registraría una lectura positiva o negativa según se aumente ó disminuya el valor de la resistencia, lo cual es precisamente lo que se necesita.

En la figura 9 se muestra un circuito de cuarto de puente (porque utiliza como elemento activo una de las cuatro resistencias), donde R_1 representa a la galga. Nótese que hay 3 cables, 2 de ellos comunes a una terminal y conectados al punto C de conexión con la rama AC y al galvanómetro, mientras que el otro cable se conecta en A; es recomendable hacerlo así a fin de que la resistencia eléctrica del cable conductor no se registre como variación de R_1 . Si la instalación de la galga estuviera sujeta a cambios notorios de temperatura, el galvanómetro podría reportar una lectura sin presentarse una deformación realmente, provocando que la dilatación térmica del elemento en el que se encuentre la galga sea interpretada como esfuerzo y no simplemente como dilatación; esto puede corregirse utilizando un circuito de medio puente.

La figura 10 corresponde a un circuito de medio puente, en el que las resistencias R_1 y R_4 son utilizadas como elementos activos. Éste podría ser el caso, por ejemplo, de un elemento estructural instrumentado con una galga activa, y otra idéntica, montada sobre una

muestra aparte del mismo material y que solo responde a las dilataciones térmicas. En otras palabras, la segunda galga actúa como un compensador que equilibra las deformaciones que por temperatura sufre el elemento activo, evitando así que éstas sean interpretadas como esfuerzo.

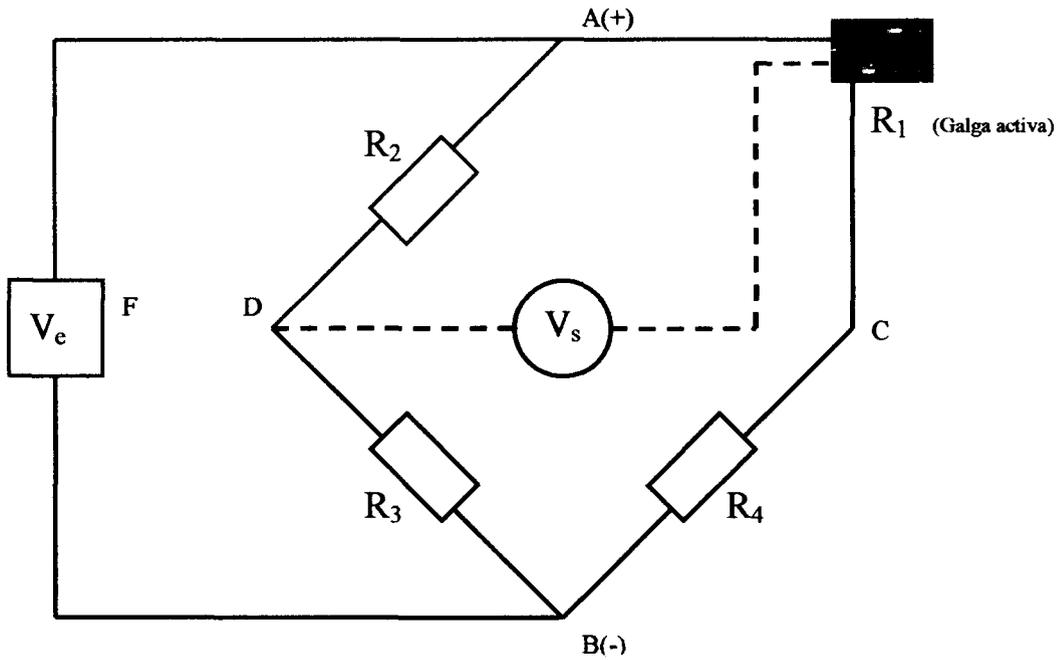


Figura 9. Circuito de cuarto de puente con tres cables.

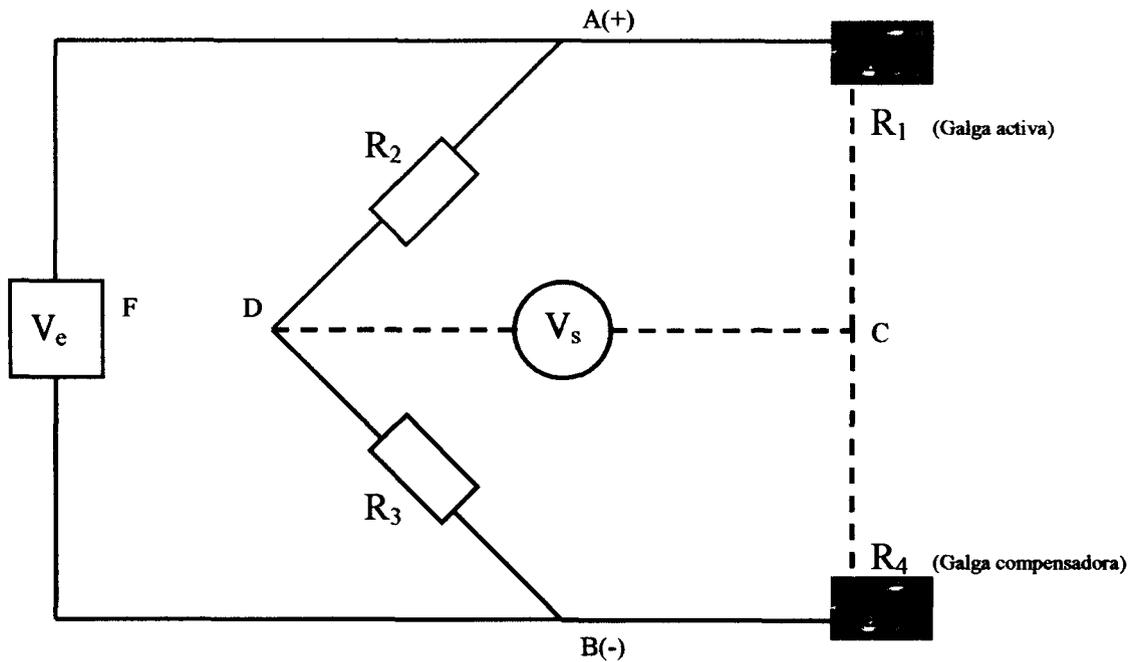


Figura 10. Circuito de medio puente.

En las figuras 8, 9 y 10 se han empleado el color rojo para positivo, negro para negativo y blanco para la medición del diferencial de voltaje, con la finalidad de implementar un código de color al cableado de los proyectos donde se utilicen galgas extensométricas y en el laboratorio de estructuras del ITESM.

La figura 11 muestra una viga en voladizo en la que se han instrumentado 2 galgas, una actuando a tensión y la otra a compresión, por lo que al estar en ramas distintas del puente y al tener signos contrarios sus deformaciones, éstas se sumarán duplicando la señal enviada al puente y con ello la precisión de la lectura.

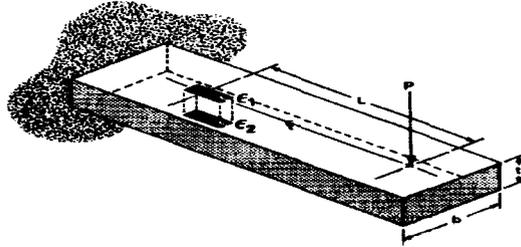


Figura 11. Viga en voladizo instrumentada a medio puente (Modificada de Micro Measurements 2005).

En la figura 12 se muestra una viga instrumentada con un circuito de puente completo. En él, las cuatro resistencias son activas lo que, como en el caso de la viga, puede ayudar a obtener mayor precisión en las lecturas (esta configuración es la que se emplea en otros transductores).

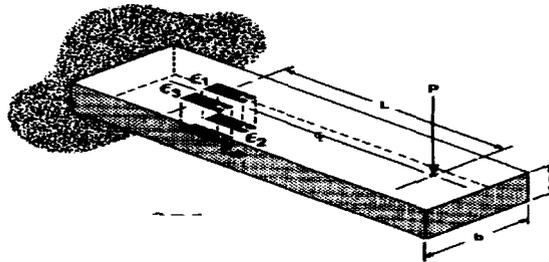


Figura 12. Viga en voladizo instrumentada a puente completo (Modificada de Micro Measurements, 2005).

2.8.3 Cementación de galgas

Ya se comentó que las galgas son dispositivos que deben estar firmemente pegados al elemento estructural que se pretende analizar; esta acción es particularmente importante debido a que la galga habrá de transmitir íntegramente las deformaciones que sufra la superficie del material en que se encuentre instalado, por lo que, cualquier falla, burbuja ó impureza podría dar origen a lecturas erróneas; con consecuencias graves que podrían ocurrir al interpretar valores de esfuerzos incorrectos. A continuación se presentan las técnicas de

preparación de las superficies y de pegado que recomienda la compañía Measurements Group en su *Student Manual for Strain Gages Technology (2001)*.

A) Preparación de superficies.

Las galgas pueden ser cementadas satisfactoriamente en casi cualquier superficie sólida, si ésta es adecuadamente preparada. Aunque existen varias técnicas disponibles para la preparación de superficies, las técnicas y procedimientos que se muestran son los ideales para pegamento a base de cianoacrilato (recomendado M-Bond 200) y resina epóxica (recomendada AE-10).

El propósito de la preparación es desarrollar una superficie químicamente limpia, con una rugosidad superficial adecuada y una alcalinidad de ph neutro, y un trazado visible de líneas de referencia para la orientación adecuada de la galga.

A fin de asegurar la máxima limpieza y óptimos resultados, deberá cuidarse siempre:

- ✓ No tocar la superficie con los dedos
- ✓ No pasar de ida y vuelta ó reusar los pañuelos de limpieza
- ✓ No arrastrar contaminantes desde la zona externa a la de preparación.
- ✓ No dejar secar por evaporación las soluciones de preparación
- ✓ No dejar parcialmente preparada la superficie ó demorar el pegado de la galga para luego continuar.

El sistema propuesto por Micro Measurements, de preparación de superficies de aluminio y acero, se reduce a cinco operaciones básicas:

1.-Desengrasado

Esta operación pretende remover aceite, grasa, contaminantes orgánicos y residuos químicos solubles. El desengrasado es siempre la primera operación. Se puede efectuar utilizando un desengrasante (CSM-1), aunque también es posible utilizar alcohol isopropílico, acetona u otros productos que sean desengrasantes enérgicos, cuidando que el desengrasante no afecte al material en el que se trabaja. De preferencia se recomienda utilizar un aplicador por aspersion para evitar recontaminación por el solvente que escurre. Se debe utilizar una gasa o pañuelo desechable para limpiar un área de 100 a 150 mm, alrededor del punto en donde se pretende instrumentar. Es importante emplear las gasas y pañuelos una sola vez y en una sola dirección. Esta operación se ilustra en la figura 13.

2.- Lijado de superficie

La superficie debe ser lijada para eliminar óxido, pintura, rebabas o cualquier otro tipo de imperfecciones o materia extraña que se encuentre adherida; de tal forma que se obtenga una superficie lisa y sin poros, adecuada para el pegado. En el caso de superficies muy burdas, podría ser necesario devastar con lija muy gruesa, lima o lijadora de disco (aunque se debe evitar al máximo esta práctica a fin de no reducir la sección del material).

Sin embargo en la mayoría de los casos podrá ser suficiente el uso de lija del número 220 para acero o del 320 para aluminio.



Figura 13. Desengrasado de la superficie (Vishay, 2005).

Se debe mojar la superficie con un acondicionador adecuado (M-Prep Conditioner) y lijar con lija del 200, como se ilustra en la figura 14. Se debe aplicar todo el acondicionador que sea necesario para evitar que la sección que se prepara se seque.

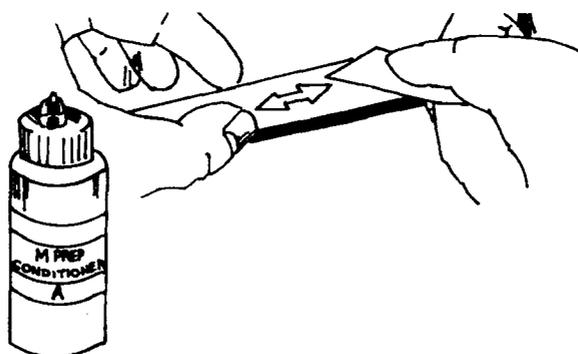


Figura 14. Lijado de superficie (Vishay 2005).

Una vez que la superficie se aprecie brillante, se debe limpiar con una gasa o pañuelo desechable, procurando utilizar un limpiador nuevo en cada pasada. La zona que se lije debe ser suficientemente grande para evitar que al limpiar se arrastren contaminantes de los alrededores. Para finalizar, se repite el mismo procedimiento utilizando ahora lija 320 para acero ó 400 para aluminio. Esta operación elimina las ralladuras de la superficie de trabajo.

3.- Trazado de ejes de referencia

Para orientar adecuadamente la galga en la dirección deseada, es necesario trazar unos ejes ortogonales de referencia. La mejor manera de trazar los ejes es dejarlos grabados químicamente al terminar el proceso, ya que trazar a lápiz dejaría rastros de carbón y rayar el material dañaría la superficie. Para ello se utiliza un lápiz 2H ó 3H para aluminio o una pluma o punta de bronce para acero, trazando los ejes de referencia con una regla metálica previamente desengrasada. Los siguientes pasos eliminan cualquier contaminante adicional.

4.- Acondicionamiento de la superficie

Después de trazar los ejes, se aplica abundante acondicionador a la superficie y se le deja alrededor de 60 segundos (esto permite que las líneas marcadas se graben químicamente), luego se debe limpiar como se ha indicado (con gasa o pañuelo desechable nuevo y de una sola pasada), aplicando acondicionador nuevamente tantas veces como sea necesario (no debe permitirse que la superficie se seque por evaporación, así que esta operación deberá hacerse rápidamente), hasta que el limpiador quede completamente sin rastros; entonces, después de la última pasada (todas deben ser en una sola dirección como se ilustra en la figura 15), se da una más en sentido contrario, con un limpiador nuevo.

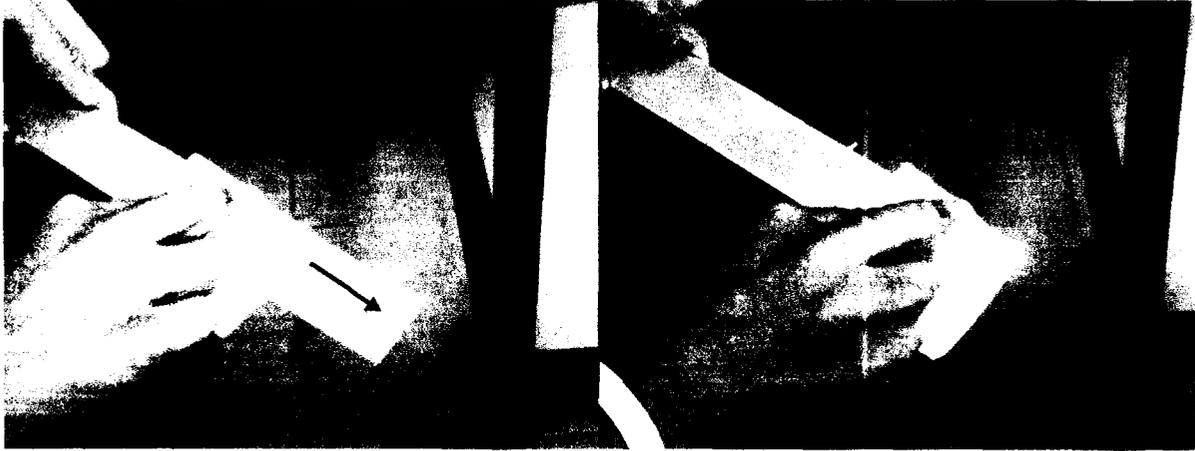


Figura 15. Acondicionamiento de la superficie.

5.- Neutralización de la superficie

A fin de que la alcalinidad de la superficie sea adecuada (neutra, ph 7) para la aplicación de los pegamentos recomendados (M-Bond 200 o el AE-10 de Micro Measurements), la superficie debe ser neutralizada aplicando abundante líquido neutralizador "M-Prep Neutralizer 5A" con un isopo (ver figura 16) y secando con gasas o pañuelos, como se ha mencionado. Se repite la operación dos o tres veces, evitando que el neutralizador seque por evaporación. Después de la última pasada, se da una más en sentido contrario, cuidando no invadir la zona exterior a la de trabajo para no arrastrar contaminantes. Si se han seguido las instrucciones, la superficie estará lista para pegar la galga. La instalación deberá hacerse en no más de 30 minutos para aluminio ó 45 minutos para acero.



Figura 16. Neutralización de la superficie.

B) Pegado de la galga.

Como se ha mencionado, una galga es capaz de hacer mediciones altamente precisas y confiables de las deformaciones que sufra la superficie en que se encuentre instalada; es por ello que resulta indispensable garantizar una excelente adherencia y para lograrlo es necesario utilizar pegamentos que puedan asegurar su estabilidad por el tiempo que exija la prueba o medición. Es también necesario que el pegamento sea adecuado a los cambios de temperatura de la instalación, lo suficientemente elástico para que sufra deformaciones lineales acordes a las de la superficie de prueba y sobre todo que el fabricante garantice que sus propiedades no cambien de un lote a otro.

Existen en el mercado múltiples pegamentos disponibles, sin embargo, muy pocos de ellos cumplen con las características que se requieren en las pruebas experimentales; es por esta razón que es recomendable el uso de los pegamentos fabricados o recomendados por la misma compañía que fabrica las galgas. Las propiedades más importantes que debe satisfacer un pegamento ideal son:

- Que forme una capa delgada y libre de burbujas.
- Con una alta resistencia al cortante.
- Que sea compatible con el material de la galga y la superficie de instalación.
- Con una amplia gama de temperaturas de operación.
- Que se deforme linealmente y estable con el tiempo.
- Que no requiera ser mezclado.
- Con mínimo tiempo de pegado.
- Que no requiera ser presionado por mucho tiempo.
- Que no endurezca muy rápidamente al momento de ser aplicado.
- Muy elástico.
- Máximo tiempo de caducidad.

Existen algunos pegamentos que satisfacen los requisitos para la instrumentación adecuada de pruebas experimentales; de tal forma que el problema se reduce a la elección del pegamento y al seguimiento de la técnica de pegado adecuada a él. Se describen a

continuación las técnicas recomendadas por Micro Measurements para sus pegamentos (M-Bond 200 y AE-10), las cuales han sido desarrolladas y probadas para garantizar una instrumentación exitosa. Es muy importante seguir todos los pasos descritos a continuación.

1.- Manejo y preparación

➤ Una vez que la superficie se encuentra preparada y químicamente limpia (en caso de que accidentalmente se haya contaminado la superficie, tanto de trabajo como de la galga, o se sospeche de ello, es recomendable limpiar con una gasa o pañuelo humedeciendo la zona con neutralizador o alcohol y esperar unos minutos para garantizar el completo secado), se procede a lo siguiente:

➤ Mediante unas pinzas de punta fina (previamente desengrasadas), se remueve la galga de su cubierta de acetato y se coloca sobre un vidrio o caja de galgas (también químicamente limpia) con su cara de pegado hacia abajo (puntos para soldar hacia arriba); se colocan las terminales (si se requieren) en la posición elegida, manejándolas con cuidado y dejando por lo menos 1.5 mm entre la galga y la terminal.

➤ Utilizando de 8 a 12 cm de cinta de celofán se fija un extremo de la misma en el vidrio ó caja, alineándola con la galga y las terminales; con un dedo se desliza la cinta sobre ellos, para luego despegarla (ya con la galga y terminales adheridas) levantando lentamente y con un ángulo no mayor de 45° hasta que la cinta quede libre (como se muestra en la figura 17). No exceder el ángulo es muy importante a fin de evitar doblar mucho la galga y dañarla permanentemente.

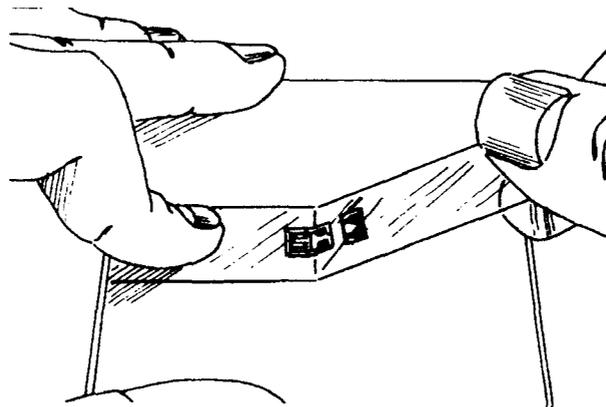


Figura 17. Preparación de la galga (Vishay 2005).

➤ Una vez realizado lo anterior, la galga se encuentra lista para ser colocada en la zona previamente preparada, donde se han trazado los ejes de referencia. Se despega la cinta del vidrio o caja y colocándola entre los pulgares se alinean las marcas de la galga (los triángulos en el eje central longitudinal y transversal) con los ejes; en caso de no quedar alineados, se despega la cinta y se repite el procedimiento. En la figura 18 se ilustra lo anterior.



Figura 18. Centrado de la galga sobre la superficie.

➤ Una vez colocada la galga sobre el elemento, se debe aplicar el pegamento; para ello, se levanta un extremo de la cinta, como se muestra en la figura 19, empezando por el lado opuesto a las terminales hasta que queden a la vista, luego se pega la punta hacia atrás de modo que se tengan las manos libres para la siguiente operación.



Figura 19. Anclaje previo al pegado.

2.-Pegado con pegamento a base de cianoacrilato (M-Bond 200)

➤ La aplicación del pegamento (M-Bond 200) requiere primero de una delgada capa de catalizador sobre la cara de la galga y la terminal; para ello se sumerge la brocha y se escurre en la boca de la botella unas 10 veces, de tal modo que la brocha quede apenas mojada; se coloca hacia abajo sobre la galga como se ilustra en la figura 20 y se desliza sobre ésta y la terminal de modo que se humedezca toda su área y se deja secar el catalizador por un minuto aproximadamente.



Figura 20. Aplicación de catalizador.

Los siguientes tres pasos deberán efectuarse de manera secuencial y rápidamente en no más de cinco segundos; se deben memorizar y practicar antes de empezar:

➤ Estando la cinta levantada se debe procurar que la distancia de la terminal a la unión de la cinta con la superficie del material sea de unos 13 mm. Al verificar lo anterior, se aplica en ese punto una o dos gotas de pegamento M-Bond 200, como se aprecia en la figura 21.



Figura 21. Aplicación de pegamento.

➤ Inmediatamente después se despega la punta anclada y se coloca axialmente a unos 30° de la superficie, como se ilustra en la figura 22. Se debe mantener tensa con una mano en tanto que con la otra, y con la ayuda de una gasa o pañuelo, se aplica presión hacia abajo empujando el pegamento hacia adelante y asegurando el pegado de la galga con una delgada capa del pegamento (es muy importante que la capa de pegamento sea tan delgada como sea posible, pues todo exceso reduce el éxito de la instalación), hasta que la cinta quede totalmente pegada al material. La tensión es importante para asegurar que el alineamiento se mantenga.

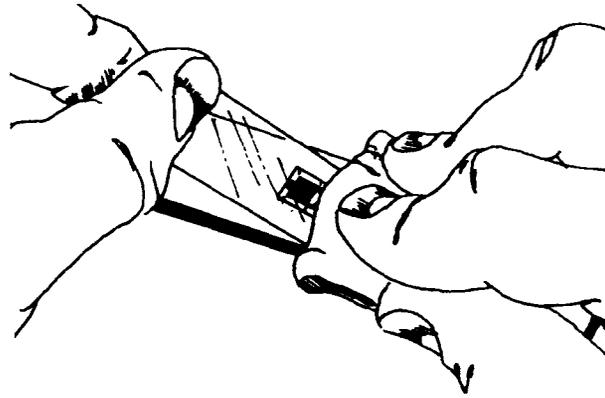


Figura 22. Pegado de la galga (Vishay, 2005).

➤ De inmediato se desecha la gasa y con el dedo se aplica una presión firme sobre la galga y la terminal, por lo menos durante un minuto (como se ilustra en la figura 23). Se debe esperar unos tres minutos más antes del siguiente paso.



Figura 23. Presión sobre la galga.

La galga y la terminal deberán estar pegadas en este paso, faltando únicamente despegar la cinta por el extremo cercano a la galga y jalándola sobre sí misma lenta y firmemente, como se aprecia en la figura 24.

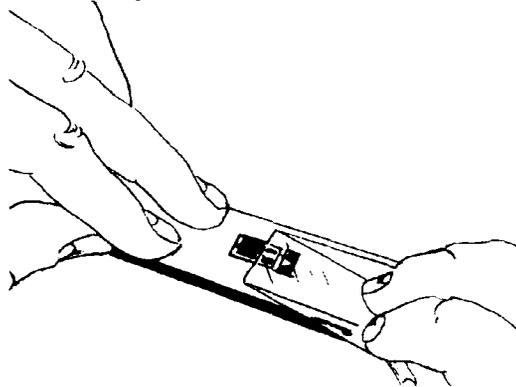


Figura 24. Galga pegada (Vishay, 2005).

3.-Pegado con resina epóxica (AE-10)

La resina epóxica requiere ser mezclada con un catalizador; su tiempo de secado depende de la temperatura ambiente y puede ser necesario someter a calentamiento los elementos instrumentados para reducirlo. Es muy importante seguir estrictamente las instrucciones que marque el fabricante, pues es común tender a economizar resina y ello puede propiciar errores en las proporciones exactas que requiere la mezcla.

➤ Se mezcla la resina y el catalizador como recomienda el fabricante y se aplica una delgada capa del pegamento (procurando tomar la pequeña porción de la parte central de la mezcla, lo que reduce la posibilidad de que esté mal proporcionado) sobre la galga, la terminal y el material; empleando la varilla con la que se mezclaron (como se aprecia en la figura 25). Se debe cuidar no utilizar resina sin mezclar, para asegurar esto, se limpia bien la varilla antes de aplicar el pegamento. Después de aplicar el pegamento, se procede inmediatamente con el siguiente paso.

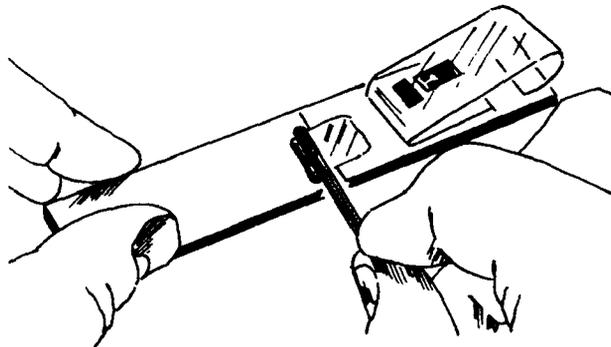


Figura 25. Aplicación del pegamento AE-10 (Vishay, 2005).

➤ Se despega la punta anclada y se coloca axialmente a unos 30° de la superficie, como se ilustra en la figura 26. Se debe mantener tensa con una mano en tanto que con la otra, y con la ayuda de una gasa ó pañuelo, se aplica presión hacia abajo empujando el pegamento hacia adelante y asegurando el pegado de la galga con una delgada capa de él (es muy importante que la capa de pegamento sea tan delgada como sea posible, pues todo exceso reduce el éxito de la instalación), hasta que la cinta quede totalmente pegada al material. La tensión es importante para asegurar que el alineamiento se mantenga.

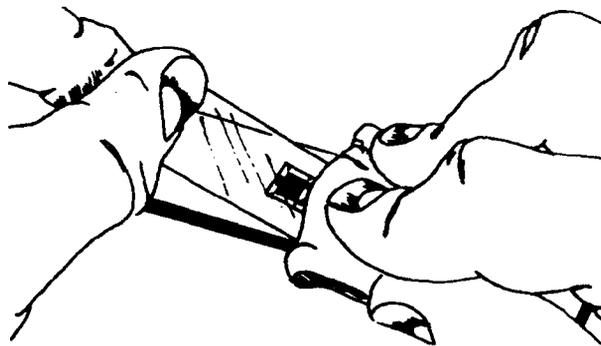


Figura 26. Pegado de la galga (Vishay, 2005).

➤ Se coloca sobre la galga y la terminal (si la hay) una pequeña tira de silicón y encima de ésta otra de aluminio u otro material rígido, que permita aplicar presión sobre ellos mediante una pinza o peso muerto. Debe asegurarse que la presión sea aplicada uniformemente sobre la instalación. Lo anterior se ilustra en la figura 27.

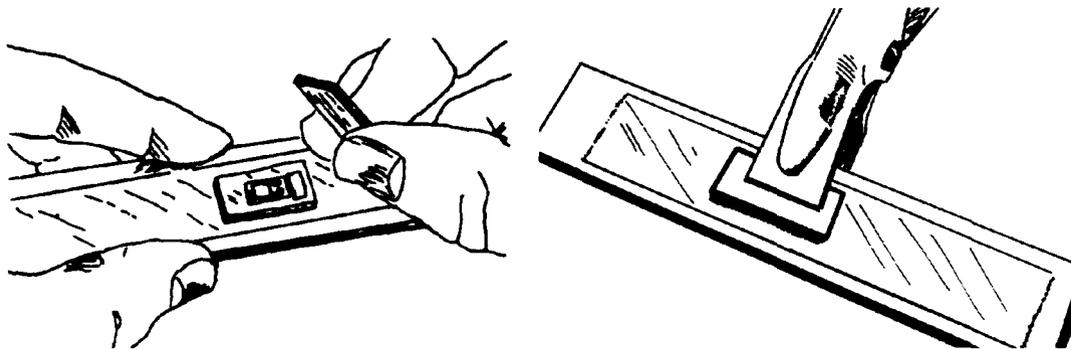


Figura 27. Presión sobre la galga (Vishay 2005).

➤ La resina epóxica seca en unas seis horas a 24° C de temperatura; este tiempo puede reducirse incrementando la temperatura de secado mediante un horno o pistola de aire caliente y seco. Para temperaturas arriba de 66° C se debe utilizar cinta especial para la instalación y colocar una cinta de teflón entre la galga y el silicón. En la figura 28 se muestra la variación del tiempo de secado en función de la temperatura. Cuando el pegamento ha secado, se remueven las tiras de protección y se despega la cinta de instalación.

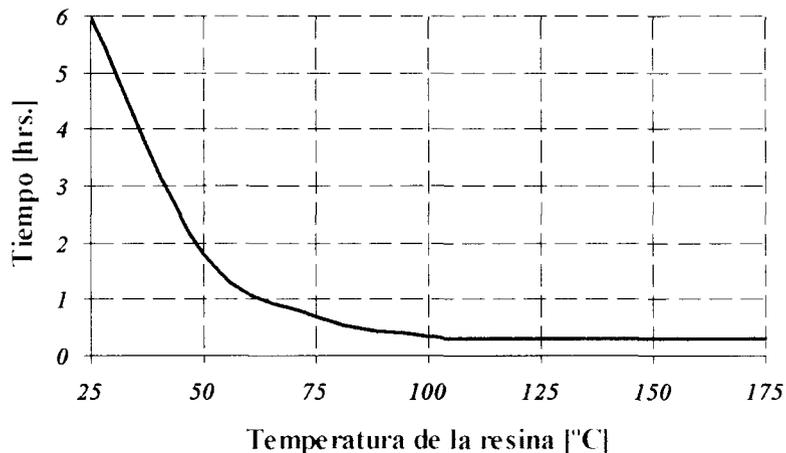


Figura 28. Tiempo de secado contra temperatura (Modificado de Vishay, 2005).

C) Soldadura

Ya que la galga ha sido pegada, se debe conectar a la terminal (si la hay) y soldarle los cables conductores que permitirán conectarla al instrumento en el que se realizarán las lecturas. Si la galga no es del tipo encapsulado, entonces deberá cubrirse con cinta como se ilustra en la figura 29, dejando expuestos únicamente los puntos en que habrán de soldarse

los conductores; esta protección evitará que se dañe la galga con la pasta de soldar o con salpicaduras de soldadura.

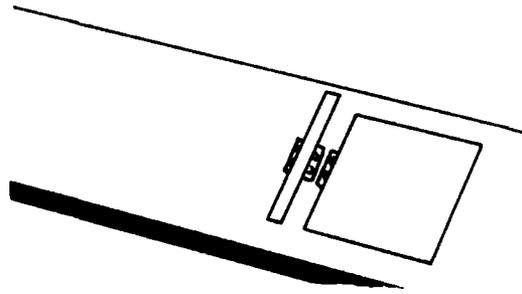


Figura 29. Protección de la galga (Vishay, 2005).

La soldadura que se utiliza normalmente tiene una temperatura de fundición de 220°C ; aunque se puede utilizar también de 183°C , 300°C ó 480°C ; dependiendo de las temperaturas de trabajo. De cualquier forma, es muy importante que la temperatura del cautín sea la adecuada al tipo de soldadura ya que si la temperatura no está cercana a la de fundición, se tendrá dificultad en soldar y podrían presentarse problemas como el de la formación de puntos de soldadura con picos (en lugar de un punto semiesférico de superficie suave). Es recomendable utilizar un cautín con regulador de temperatura o en su defecto, un cautín de 25 Watts, en el cual es más fácil no tener temperaturas excesivas.

Después que el cautín ha alcanzado su temperatura, se limpia la punta (con una esponja húmeda o un pedazo de lija) y se estaña con un poco de soldadura. De igual manera se estañan las puntas de los cables y del alambre que habrá de puentear la galga con la terminal. Posteriormente se depositan puntos de soldadura sobre la terminal y la galga, colocando el alambre de soldadura transversalmente, (como se ilustra en la figura 30), aplicando firmemente el cautín por 1 ó 2 segundos y se retiran simultáneamente la soldadura y el cautín; deberá formarse un punto de soldadura semiesférico de superficie suave, de lo contrario, se repite el proceso.

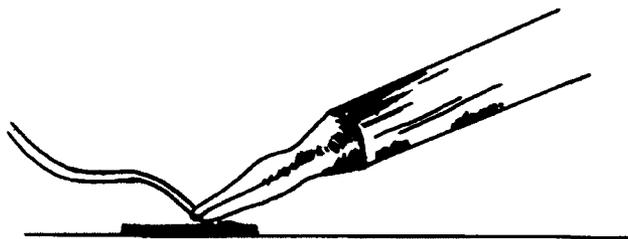


Figura 30. Puntos de soldadura sobre la galga (Vishay, 2005).

Si se usa cable ó alambre dúplex ó triplex (2 ó 3 conductores unidos), se separan los conductores unos 20 mm y se descubren unos 3 ó 4 mm del aislante de cada uno. Como se ve en la figura 31, existen diferentes tipos de terminales y por lo tanto formas de soldar los conductores, la elección de uno de ellos depende básicamente de las limitaciones de la instrumentación que se realice (caso a, b, c, d, f), mientras que el caso e corresponde a galgas

del tipo CEA de Micro Measurements que no requieren terminales y las que comúnmente se emplean en pruebas experimentales.

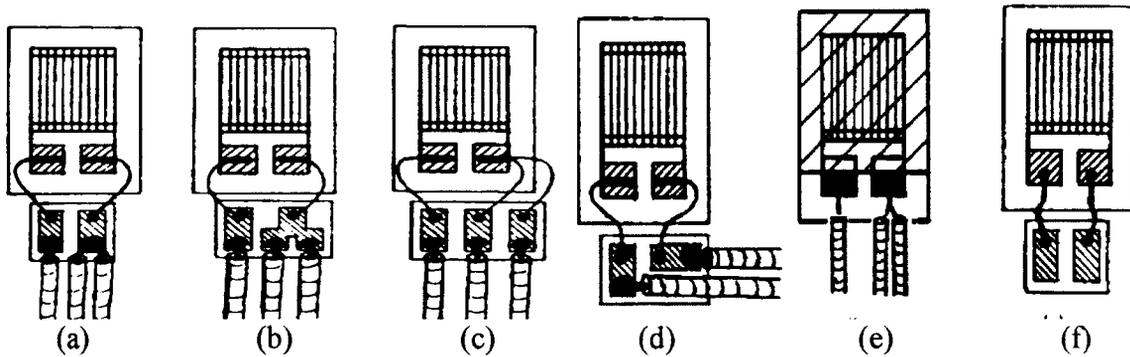


Figura 31. Tipos de terminales (Modificado de Vishay, 2005).

Se utiliza cinta adhesiva para fijar los conductores al espécimen, de modo que se puedan colocar las puntas de ellos sobre los puntos de soldadura, se aplica entonces la soldadura y el cautín como se observa en la figura 32, por 1 ó 2 segundos como se explicó anteriormente, retirando al mismo tiempo ambos. Una vez terminado este paso, se limpia perfectamente todo exceso de pasta de soldar o fundente, secando con una gasa, pañuelo desechable o punta de algodón. Se fijan los conductores perfectamente para evitar que un jalón pueda desprender la terminal o la galga.



Figura 32. Soldadura de cables.

Con un multímetro se verifica la resistencia de la instalación, ésta última deberá estar dentro del rango que marque la información que acompaña a las galgas. Finalmente se debe proteger la instalación para evitar que ésta se afecte por la humedad, el polvo u otros agentes. Para instalaciones que no estén sometidas a condiciones particularmente difíciles, puede utilizarse cera de abeja previamente deshidratada (se deja por al menos una hora a 60° C en un horno), o alguno de los productos recomendados por los fabricantes.

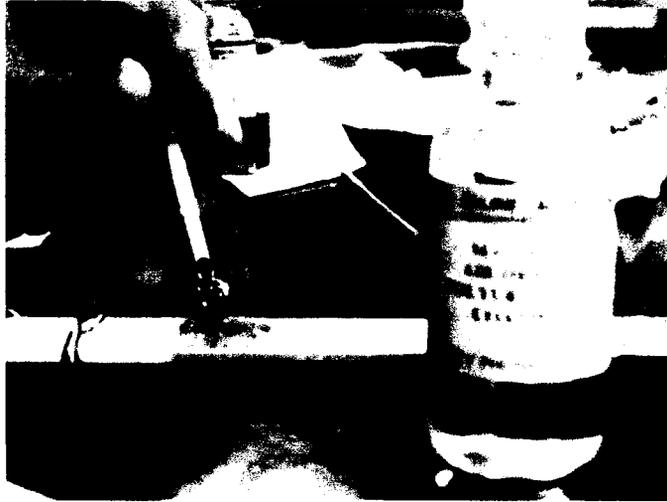


Figura 33. Protección de la galga.

Tras este último procedimiento se tiene ya lista la instalación para conectarla al puente de Wheatstone. En el anexo 2 se presenta una lista con los materiales y el tiempo de compra sugerido antes de la cementación.

2.8.4 Selección de galgas

A continuación se presenta una tabla de selección de galgas y pegamentos, realizada a partir de la información de Vishay (2005):

Selección típica de galgas y pegamentos

Tipo de prueba o aplicación	Rango de temperaturas de operación	Duración de la prueba (hrs.)	Precisión requerida *	Capacidad de ensayos cíclicos		Selección típica	
				Deformación máxima [μ]	Número de ciclos	Tipo de Galga	Pegamento
Ensayos comunes de análisis de condiciones estáticas o dinámicas	-45°C a +205°C	<10E ⁴	Normal	± 1300	<10E ⁶	CEA, EA	200 ó AE-10
		>10E ⁴	Normal	± 1300	<10E ⁶	CEA, EA	AK-10 ó AE-15
		>10E ⁴	Alta	± 1600	>10E ⁶	WA, SA	AE-15 ó 610
		>10E ⁴	Muy alta	± 2000	>10E ⁶	WE, SK	AE-15 ó 610
	-45°C a +205°C	<10E ³	Normal	± 1600	<10E ⁶	WA, SA	600 ó 610
		>10E ³	Alta	± 2000	<10E ⁶	WK, SK	600 ó 610
	-269°C a +230°C	>10E ³	Normal	± 2000	>10E ⁶	WK, SK	610
< 315°C	<10E ²	Normal	± 1800	<10E ⁶	WK	610	
<370°C	<10	Normal	± 1500	<10E ⁶	WK	610	
Ensayos con gran deformación (zona plástica)	-45°C a +65°C	<10	Normal	± 50 000	1	CEA, EA	AE-10
		>10E ³	Normal	± 100 000	1	EP	AE-15
		>10E ³	Normal	± 200 000	1	EP	A-12
	-20°C a +260°C	<10E ²	Normal	± 15 000	1	SA, SK, WA, WK	610
-269°C a +260°C	<10E ³	Normal	± 10 000	1	SK, WK	600 ó 610	
Pruebas de varillas	-75°C a +65°C	<10E ⁴	Normal	± 2000	1.00E+08	ED	200 ó AE-10
		<10E ⁴	Normal	± 2400	1.00E+08	WD	AE-10 ó AE-15
	-195°C a + 260°C	<10E ⁴	Normal	± 2000	1.00E+08	WD	600 ó 610
		<10E ⁴	Normal	± 2300	<10E ⁵	WD	600 ó 610
Instrumentación de transductores	-45°C a +65°C	<10E ⁴	1 a 5 %	±1300	<10E ⁶	CEA, EA	AE-10 ó AE-15
		<10E ⁶	1 a 5 %	± 1300	<10E ⁶	CEA	AE-15
	-45°C a +95°C	<10E ⁴	± 0.2%	± 1500	1.00E+07	N2A	600, 610 ó 43-B
	-45°C a +150°C	<10E ⁴	0.2 a 0.5 %	± 1600	1.00E+07	WA, SA	610
	-195°C a + 175°C	<10E ⁴	± 0.5 %	± 1800	1.00E+07	WK, SK	610

* Se deben considerar las condiciones de la prueba a realizar y de la instrumentación empleada. Por lo general "normal", en análisis de esfuerzos, significa un rango del 2 al 5 %, "alta" de 1 a 3 % y "muy alta" el 1 % o menor.

Tabla 1. Selección típica de galgas.

2.9 Medición de desplazamiento

El desplazamiento lineal es el movimiento en la dirección de un solo eje. Se conoce como equipo de medición de desplazamiento a aquel cuya lectura indica la distancia que un objeto ha viajado desde un punto de referencia. De igual forma, la medición de desplazamiento indica, por medio del signo, la dirección del movimiento.

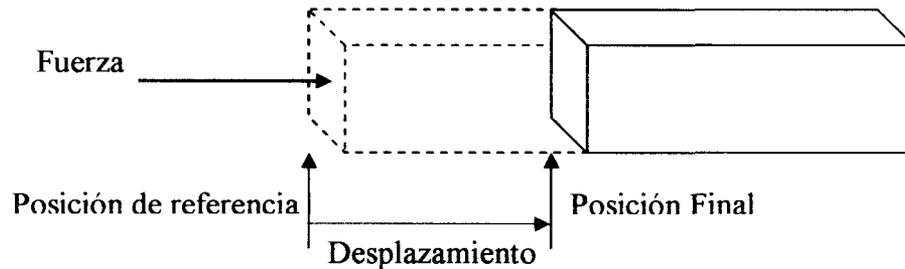


Figura 34. Desplazamiento.

El desplazamiento lineal tiene unidades de longitud, existiendo diversos equipos que pueden registrarlo. Estos dispositivos pueden clasificarse en mecánicos y transductores de desplazamiento. Ejemplo de cada uno de estos equipos son los relojes comparadores y los transductores de desplazamiento lineal.

2.9.1 Reloj comparador

Es un equipo mecánico que normalmente utiliza carátula circular, cuyo intervalo de operación varía dependiendo del modelo empleado. En el caso que se ilustra en la figura 35, la escala es de 0-10 mm; la escala principal está graduada en 100 divisiones de 0.01 mm y la escala pequeña en 10 divisiones de 1 mm, donde cada una de estas últimas divisiones corresponde a una vuelta completa de la escala principal.

Para poner en ceros el equipo, se debe rotar manualmente la escala. Su mecanismo consiste en una barra exploradora que por lo general termina en una punta de medida. La barra está engranada con un engrane que forma parte de un sistema de ruedas dentadas.

El reloj comparador se monta usualmente sobre un soporte, por medio de un brazo que se fija a la columna de la base; dicho brazo se puede colocar en cualquier posición. A su vez la columna de la base puede fijarse en cualquier punto de la estructura. Algunos relojes comparadores tienen una base magnética articulada, por lo tanto puede colocarse en distintas posiciones, facilitando así el control de distintas superficies: planas, cilíndricas interiores y exteriores, etc. En la figura 36 se aprecia una base para montar un reloj comparador.

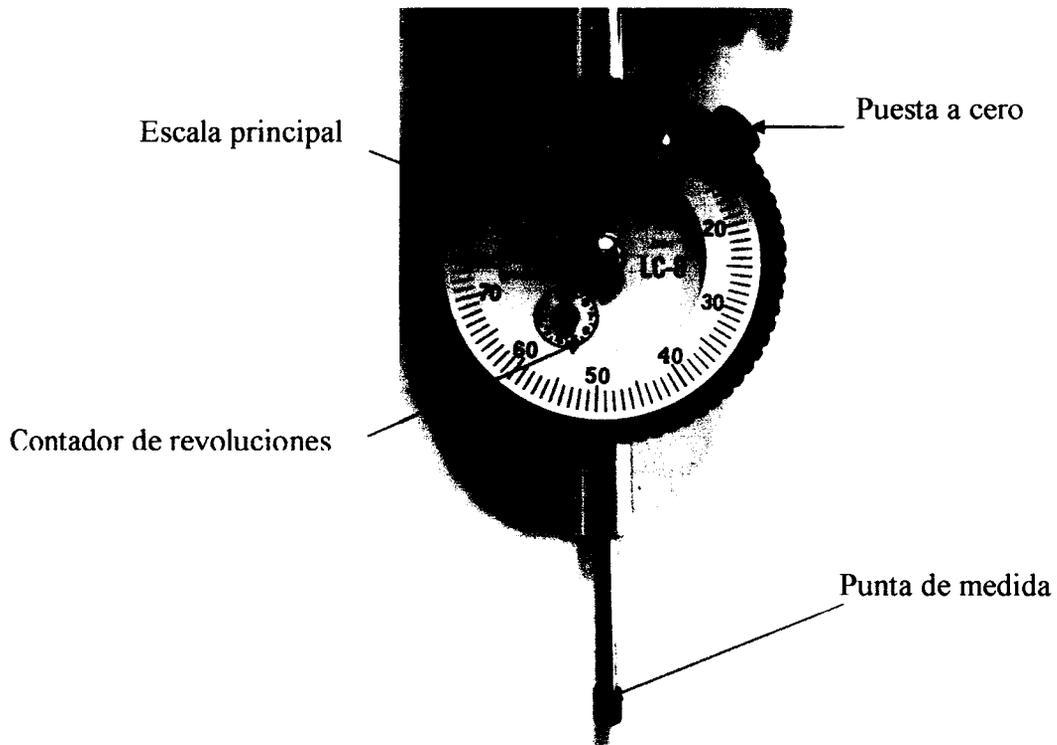


Figura 35. Reloj Comparador.

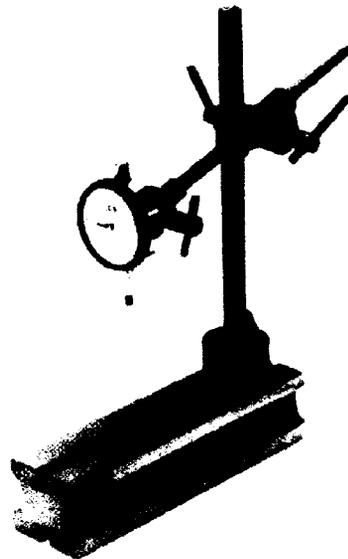


Figura 36. Base del reloj (Dyergage, 2005).

Criterios de selección y operación

La visibilidad es un punto de interés para una adecuada lectura en pruebas experimentales. De acuerdo a las condiciones de la prueba, se debe elegir el tamaño de la cara del disco. Mientras mayor sea el diámetro del disco, la visibilidad mejora y la lectura se realiza fácilmente. Si el reloj comparador va a ser utilizado en pruebas destructivas, debe ser considerado un modelo a prueba de golpes. Finalmente, si el equipo va a trabajar en condiciones de humedad, se recomienda sellar y proteger el equipo; instalando un anillo en la carátula.

2.9.2 Transductor Lineal Diferencial Variable (LVDT)

El transductor lineal variable diferencial (*Linear Variable Differential Transducer*; LVDT) es empleado para medir desplazamiento. Los LVDT's operan bajo el principio del transformador al convertir el desplazamiento en un cambio de tensión alterna; gracias a la alteración del campo magnético entre dos o más bobinas, originado por la corriente alimentada al transformador. En un transformador, la relación entre el voltaje a la entrada y a la salida es proporcional al número de espiras del primario (N_p) y en el secundario (N_s)

$$\frac{V_s}{V_e} = \frac{N_s}{N_p}$$

Un LVDT cuenta con un primario y dos secundarios. Entre la entrada y la salida se coloca un núcleo móvil de ferrita. Los dos secundarios se encuentran enrollados en sentido contrario uno respecto al otro y sus extremos están unidos; por lo que la salida de voltaje es nula si el núcleo está centrado, pues la salida de ambos está en oposición.

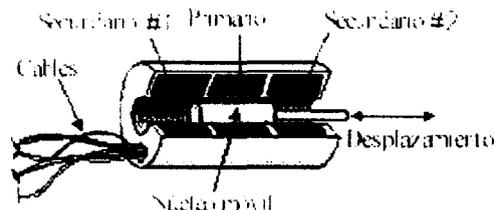


Figura 37. Composición de un LVDT (Garcimartin, 2005).

Al moverse el núcleo, uno de los dos secundarios es más eficiente que el otro y el voltaje deja de ser nulo. Las unidades comerciales están contenidas en un montaje cilíndrico cerrado. De acuerdo a lo discutido en la sección 2.7, a este tipo de transductor se le conoce como activo, pues hay que excitar el transformador típicamente a 3 kHz. y 1 V.

El LVDT ofrece una respuesta lineal hasta varios centenares de Hz, por lo que sirve para registrar desplazamientos por debajo de esas frecuencias. La resolución es infinitesimal, puesto que no depende de las espiras sino de la posición del núcleo, que puede variar de forma continua. Típicamente se ofrece una linealidad del 0.1% de la escala completa. En la práctica se obtienen resoluciones de $\pm 1 \times 10^{-6}$ m fácilmente, y algunos LVDT ofrecen hasta \pm

1×10^{-9} m. Otra ventaja es la ausencia de fricción entre el elemento móvil (el núcleo de ferrita) y el elemento detector, por lo que no existe desgaste mecánico.

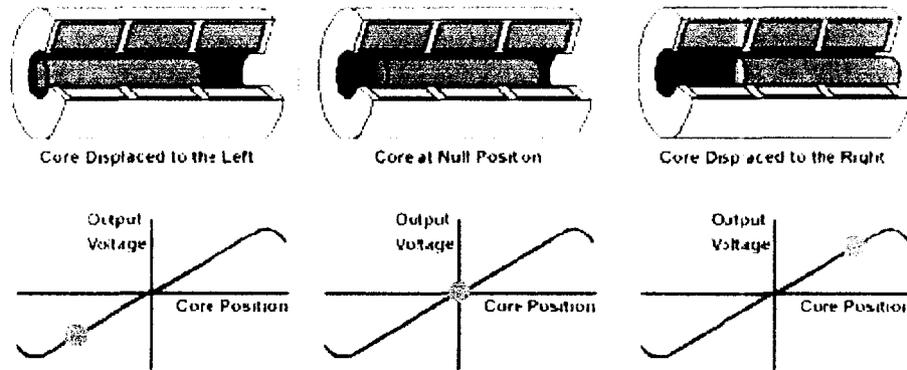


Figura 38. Variación del voltaje de salida respecto a la posición del núcleo (NI, 2005).

Es necesario fijar el núcleo de ferrita de manera que quede bien centrado en el hueco del cilindro y que se desplace paralelamente a su eje. Además, el recorrido de los LVDT está limitado prácticamente a decenas de centímetros.

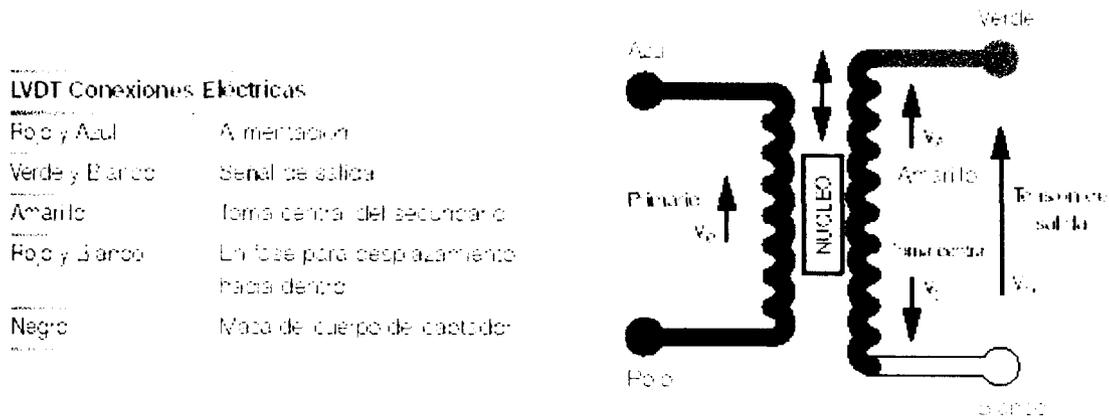


Figura 39. Cableado típico de un LVDT (Solartron, 2004)

Características y beneficios de los LVDT's

Los LVDT's tienen ciertas características y beneficios significativos, algunos de los cuales provienen de los principios fundamentales de la física, de la operación o de los materiales y técnicas empleadas en su fabricación. Ya se han mencionado algunos beneficios y características, pero ahora se enlistan los más importantes:

A) Operación libre de fricción. En uso normal, no hay contacto mecánico entre el núcleo del LVDT y el bobinado, no hay roce, arrastre u otra fuente de fricción. Esta característica es particularmente útil en pruebas de materiales y medición de desplazamiento por vibración.

B) Resolución infinita. Puesto que los LVDTs operan sobre principios electromagnéticos en una estructura libre de fricción, miden cambios infinitamente pequeños en la posición del núcleo. Esta capacidad de resolución infinita es limitada solamente por el centro de adquisición de datos y por el registro de salida (redondeo).

C) Vida mecánica ilimitada. Este factor es especialmente importante en aplicaciones de alta confiabilidad, tales como aeroplanos, satélites, vehículos espaciales e instalaciones nucleares. Así también es altamente deseable en varios controles de proceso industrial y sistemas de automatización de fábrica.

D) Sensibilidad de eje simple. El LVDT responde al movimiento del núcleo a lo largo del eje del bobinado, pero es generalmente insensible al movimiento en el eje transversal del núcleo o a su posición radial. Por ello, un LVDT generalmente puede funcionar sin efectos adversos en aplicaciones que implican movimientos no alineados o flotantes, y en casos donde el núcleo no se mueve exactamente en línea recta. Esto es muy útil en pruebas donde el espacio para instrumentar sea reducido o de difícil acceso, permitiendo instalar los LVDTs sobre grúas, de forma vertical y demás configuraciones pertinentes.

E) Apto en diversos ambientes de trabajo. Las técnicas de construcción y materiales usadas en el armado de un LVDT, hacen de él un sensor durable y resistente en una gran variedad de condiciones ambientales. La unión de los bobinados es seguida por un encapsulado epóxico en el casco, resultando más resistente a la humedad y capaz de absorber choques, cargas considerables y altos niveles de vibración en todos los ejes. El casco y el núcleo están hechos de metales resistentes a la corrosión, el casco también actúa como un escudo magnético suplementario. Y para las aplicaciones donde el LVDT debe resistir la exposición a vapores y líquidos combustibles o corrosivos, u operando en fluidos comprimidos, el casco y el bloque ensamblado de las bobinas pueden sellarse herméticamente usando una gran variedad de procesos de soldaduras existentes para dicho fin. Los LVDTs ordinarios pueden operar bajo una gama de temperatura muy amplia.

G) Rápida Respuesta Dinámica. La ausencia de fricción durante la operación normal permite que un LVDT responda muy rápido a los cambios de posición del núcleo. La respuesta dinámica de un sensor LVDT esta autolimitada solamente por los efectos inerciales de la masa delgada de núcleo. Frecuentemente, la respuesta de un LVDT es determinada por las características del centro de adquisición de datos.

H) Salida Absoluta. Un LVDT es un dispositivo de salida absoluta, a diferencia de un dispositivo de salida incremental. Esto significa que en caso de pérdida de alimentación, los datos de posición que son enviados desde el LVDT no se perderán. Cuando el sistema de medición es reiniciado, el valor de salida del LVDT será el mismo que tuvo antes del fallo de la alimentación o pausa de la prueba.

2.10 Medición de la carga

La carga es una magnitud muy importante en la realización de pruebas experimentales, por lo que su correcta medición es vital durante la interpretación de los resultados obtenidos. Se conoce como equipo de medición de carga a aquel cuya lectura indica la fuerza que se ha aplicado en un punto en particular. Pueden aplicarse cargas distribuidas, pero éstas usualmente se simulan aplicando una carga puntual a un distribuidor de carga colocado a lo largo del espécimen, por lo que un mismo instrumento sirve para medir los diferentes tipos de carga aplicados en pruebas experimentales. En la figura 40 se muestra una viga sujeta a una carga puntual en el centro de su claro. La carga tiene unidades de fuerza y existen diversos equipos que pueden registrarla. El equipo más empleado para medir la carga es un transductor denominado celda de carga.

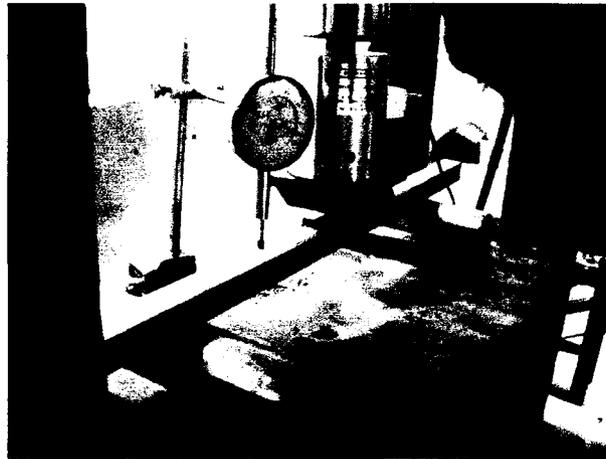


Figura 40. Viga con carga puntual en el centro del claro.

2.10.1 Celda de carga

La celda de carga es el tipo de transductor de fuerza que más se emplea. Este transductor está dotado de galgas extensométricas y su configuración es la de un puente completo. La celda convierte una fuerza aplicada en una variación del voltaje presente en la salida del puente. Las celdas de carga que emplean galgas tienen generalmente una resistencia de 350 ohms y una sensibilidad de 2mV/V a plena escala, es decir, por cada Volt que se aplique al puente, la salida será de 2mV . En la figura 41 se aprecia una celda de carga típica.



Figura 41. Celda de carga típica (Omega, 2005).

Características de las Celdas de carga

Las características fundamentales en el empleo de una celda de carga y que definen su calidad y utilidad en una prueba experimental son las siguientes:

A) Margen o campo de medidas. Es el rango de fuerza (expresado en unidades de fuerza) que el transductor es capaz de convertir sin alterar sus características de medición. El margen de medidas puede ser unipolar (compresión) o bipolar (compresión y tensión).

B) Valor de sobrecarga estática admitido. Es la máxima fuerza que puede soportar el dispositivo sin dañarse.

C) Temperatura. Es importante conocer el campo de temperaturas de funcionamiento, de almacenamiento y el campo de precisión primaria (el rango de temperaturas dentro del cual los datos de medición satisfacen valores determinados).

D) Linealidad. Es importante para satisfacer la exactitud de las medidas y consiste en el comportamiento de la lectura realizada por el instrumento respecto a una línea recta especificada. La linealidad se expresa en porcentaje del valor de plena escala y tiene que ver con la adecuada calibración del equipo. El tiempo de calibración es proporcionado por el fabricante. En la figura 42 se muestra la relación carga-voltaje deseada.

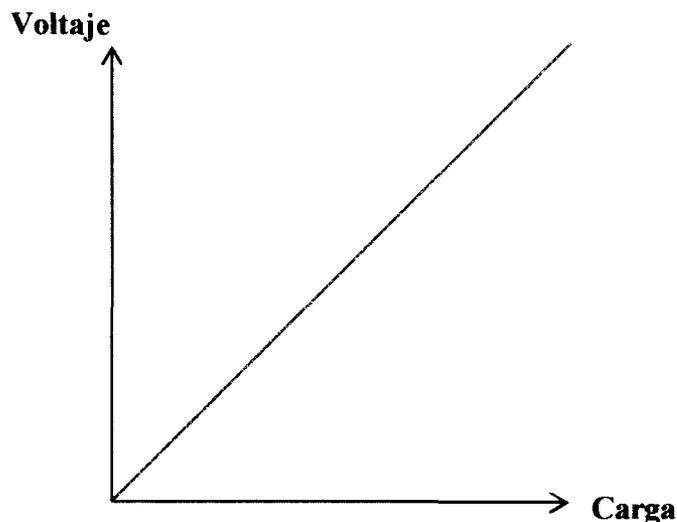


Figura 42. Recta óptima de la linealidad de una celda de carga.

E) Resolución. Es la más pequeña variación detectada de la magnitud de salida. Este parámetro se expresa como el inverso del valor de la señal de salida para una determinada entrada unitaria.

F) Repetibilidad. Indica la capacidad que tiene el transductor de reproducir la señal de salida cuando a la entrada se presenta, en tiempos sucesivos, la misma muestra de magnitud a medir. Esto es sumamente importante en pruebas de carga y descarga. Se expresa como porcentaje del valor a plena escala

G) Estabilidad. Expresada en porcentaje del valor de plena escala, indica la capacidad que tiene la celda de mantener el valor de la señal de salida cuando en la entrada se mantiene fijo el valor de la fuerza a convertir.

2.11 Medición de la presión

La presión es la relación entre la fuerza y la superficie; en el Sistema Internacional de Medidas, la unidad que se utiliza es el Pascal (Pa) que corresponde a un Newton por metro cuadrado (1 N/m^2). Comúnmente en la industria la presión se expresa mediante otras unidades: el bar, las libras por pulgada cuadrada (PSI = pound square inch), la atmósfera, los milímetros de mercurio (mmHg) o los centímetros de columna de agua (cm H₂O). Para evaluar la presión se emplean transductores de presión para realizar una medición de presión y ésta se puede llevar a cabo de tres formas:

Presión absoluta. La cual se mide con respecto al vacío.

Presión relativa. Ésta se mide respecto a la presión atmosférica a nivel del mar.

Presión diferencial. Ésta se mide respecto a una presión de referencia determinada.

2.11.1 Transductores de presión

Como se mencionó anteriormente, un transductor es un dispositivo que realiza una conversión de una magnitud física en otra, en este caso un transductor de presión convierte una presión en voltaje. En la práctica generalmente estos transductores constan de dos etapas, la primera convierte una presión en una deformación y la segunda convierte la deformación en un voltaje.

La conversión mecánica de una presión en deformación se obtiene, normalmente, con un dispositivo llamado diafragma, el cual consiste en un disco de algún material conocido, fijo a su alrededor y cuya deflexión se puede medir. El fluido bajo presión se encuentra en contacto con una de las caras del diafragma deformándose éste de manera proporcional a la presión ejercida.

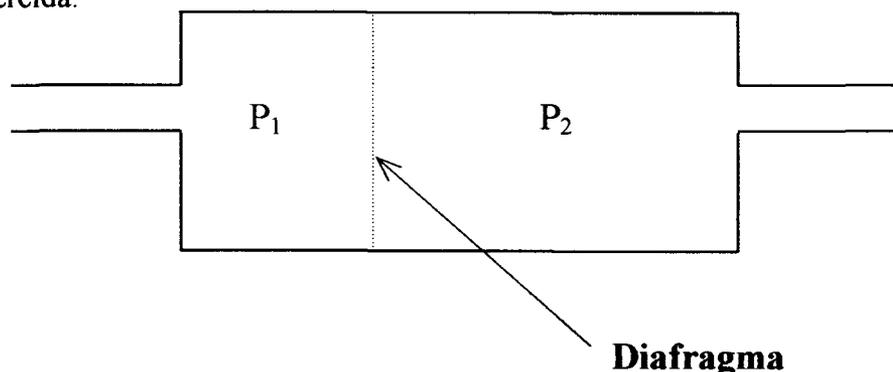


Figura 43. Esquema general de un transductor de presión.

En el caso de mediciones de presión diferenciales se aplican dos fuentes de presión diferentes a cada uno de las caras del diafragma. Dependiendo de la diferencia de presión a que se somete el diafragma se distinguen los siguientes tipos:

- *Transductor de referencia, respecto a la atmósfera (gage pressure transducer)*. El diafragma se somete por un lado a la presión desconocida y por otro está abierto a la atmósfera. La medición varía con la presión atmosférica (que se emplea como referencia).
- *Transductor de referencia sellada (sealed gage pressure transducer)*. La presión se mide respecto a una cámara sellada cerrada por el diafragma, en la cual se ha establecido una presión de referencia de 1 atm.
- *Transductor de referencia absoluta (absolute gage pressure transducer)*. En este caso, en la cámara sellada se genera el vacío (se mide la presión absoluta respecto al vacío).
- *Transductor de presión diferencial (differential pressure transducer)*. En ambos lados del diafragma se presentan presiones desconocidas de las cuales lo único que interesa conocer es la diferencia entre ellas.

Entre las diferentes técnicas que existen para medir la deformación del diafragma, existe el caso correspondiente a los transductores de presión piezorresistivos. En este tipo de transductor se colocan de una a cuatro galgas extensométricas en el diafragma. Cuando hay diferencia de presión a ambos lados del diafragma, se produce un esfuerzo mecánico sobre éste, y las galgas extensométricas experimentan variación de la resistencia. A este cambio de resistividad se le conoce como efecto piezorresistivo, de ahí el nombre que reciben estos transductores. Para conocer la variación de resistencia se configura el circuito por medio del puente de Wheatstone, como ya se ha mencionado en el apartado 2.8.2

Comercialmente, pueden encontrarse transductores con la parte electrónica externa o incorporada. Si el transductor de presión tiene la parte electrónica incorporada, se cuenta con un dispositivo que puede encapsularse. La resolución es muy alta, pero el rango de medida es limitado. Suelen ser más económicos que los transductores fabricados con diafragma de acero inoxidable y con la parte electrónica externa, que tienen como ventaja la solidez mecánica en ambientes agresivos, y un rango de medida más amplio. En la figura 44 se aprecia la diferencia entre ambos tipos de transductores.



(a) Con la parte electrónica externa

(b) Con la parte electrónica interna

Figura 44. Tipos de transductores de presión (Omega, 2005).

Características de los transductores de presión

Las características fundamentales para el empleo de un transductor de presión piezorresistivo que definen su calidad y utilidad en una prueba experimental son las siguientes:

A) El valor de presión máxima. El valor de la máxima presión que puede soportar el dispositivo sin dañarse.

B) Temperatura. Es importante conocer el campo de temperaturas de funcionamiento, de almacenamiento y el campo de precisión primaria (el rango de temperaturas dentro del cual los datos de medición satisfacen valores determinados).

C) Linealidad. Es importante para satisfacer la exactitud de las medidas y consiste en el comportamiento diferencial de la curva de calibración respecto a una línea recta especificada. Esta propiedad es la misma que se discutió en la sección 2.10.1 para celdas de carga.

D) Resolución. Es la más pequeña variación detectada de la magnitud de salida. Este parámetro se expresa como el inverso del valor de la señal de salida para una determinada entrada unitaria.

E) Repetibilidad. Indica la capacidad que tiene el transductor de reproducir la señal de salida cuando a la entrada se presenta, en tiempos sucesivos, la misma muestra de magnitud a medir. Esto es sumamente importante en pruebas de carga y descarga. Se expresa como porcentaje del valor a plena escala.

F) Estabilidad. Expresada en porcentaje del valor de plena escala, indica la capacidad que tiene la celda de mantener el valor de la señal de salida cuando en la entrada se mantiene fijo el valor de la fuerza a convertir.

G) Presión de referencia. Debe conocerse la presión de referencia con la que se desea trabajar, para poder elegir el transductor adecuado.

H) Fluido. Es importante conocer el fluido con el que se va a trabajar, pues existen transductores especiales para cada tipo de fluido (aceite, agua, aire, etc.). Cada fluido deforma de manera distinta al diafragma, por lo que la precisión de la medición depende directamente del tipo de fluido.

En la figura 45 se aprecia un transductor de presión piezorresistivo de referencia absoluta. En el extremo hueco del transductor entra el fluido a presión, mientras que en el extremo opuesto se aprecian los cables de salida que se deben conectar al centro de adquisición de datos.



Figura 45. Transductor de presión piezorresistivo (Omega, 2005).

2.12 Medición de la aceleración

En pruebas dinámicas (mesa vibratoria, análisis de maquinaria, medición de sismos, entre otras), la aceleración es una magnitud que debe registrarse. Normalmente la aceleración se mide en múltiplos de g (la aceleración de la gravedad, 9.81 m/s^2). La vibración generada por la aceleración es un parámetro crucial en el desarrollo de procesos de diseño y pruebas dinámicas experimentales. Para la caracterización de estas vibraciones es necesario el empleo de transductores de aceleración, mejor conocidos como acelerómetros (NI, 2005).

2.12.1 Acelerómetro

Es un transductor que proporciona lecturas de la variación de la aceleración con el tiempo. Los valores obtenidos se expresan en términos de g con registros a cada segundo. Consta de una masa que comprime a un disco piezoeléctrico, sujeta al otro lado por un resorte y todo el conjunto dentro de una caja metálica. Cuando el conjunto es sometido a vibración, el disco piezoeléctrico se ve sometido a una fuerza variable, proporcional a la aceleración de la masa. A medida que el acelerómetro se mueve, la masa aplica fuerza al elemento piezoeléctrico, generando una carga variable. Además de la medición de aceleración, este dispositivo se puede emplear para la medición de velocidad y desplazamiento además de la determinación de formas de onda y frecuencia. Una de las ventajas principales de este tipo de transductor es que se puede fabricar lo suficientemente pequeño que la influencia de su masa sea despreciable. En la figura 46 se aprecia un esquema de los componentes de un acelerómetro.

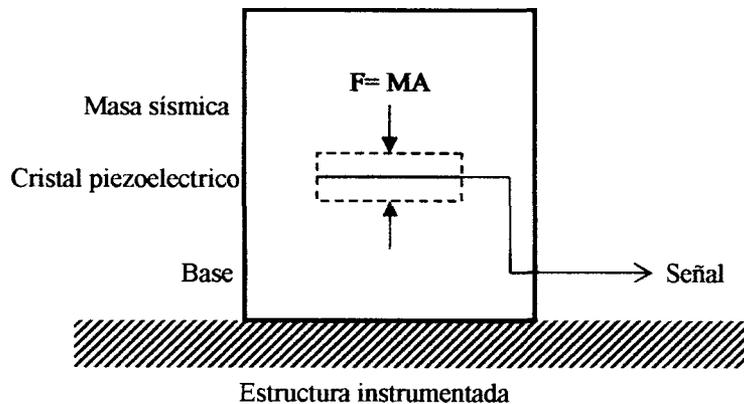


Figura 46. Componentes de un acelerómetro (Modificado de NI, 2005).

Los acelerómetros generalmente son transductores direccionales, esto quiere decir que sólo miden aceleración en un eje. Para monitorear la aceleración en tres ejes, se emplea un acelerómetro triaxial. Los acelerómetros también pueden ser clasificados en dos tipos: pasivos y activos. Los acelerómetros pasivos no requieren una fuente de alimentación externa y envían el voltaje generada por el elemento piezoeléctrico de forma directa, pero ya que la señal es muy pequeña, requieren de una amplificación de la señal. Los acelerómetros activos incluyen circuitos internos para convertir la carga del acelerómetro a una señal de voltaje, pero requieren de una fuente externa de alimentación para el circuito. En la figura 47 se muestra una fuente de alimentación común para acelerómetros activos.

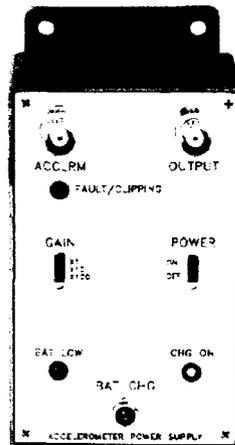


Figura 47. Fuente de alimentación para acelerómetros activos (Omega, 2005).

Características de los acelerómetros

Las características fundamentales que se deben conocer para el empleo adecuado de un acelerómetro en una prueba experimental son las siguientes:

A) El rango de medición. Se refiere a los valores máximo y mínimo de lectura que pueden registrarse (en múltiplos de g). Es necesario estimar estos valores para elegir el acelerómetro más adecuado para la prueba experimental.

B) Temperatura. Es importante conocer el campo de temperaturas de funcionamiento, de almacenamiento y el campo de precisión primaria (el rango de temperaturas dentro del cual los datos de medición satisfacen valores determinados).

C) Precisión. Es la más pequeña variación detectada de la magnitud de salida. Este parámetro se expresa como un porcentaje del valor a plena escala.

D) Repetibilidad. Indica la capacidad que tiene el transductor de reproducir la señal de salida cuando a la entrada se presenta, en varias ocasiones, la misma magnitud a medir. Esto es sumamente importante en pruebas de carga y descarga. Se expresa como porcentaje del valor a plena escala.

E) Tensión de alimentación. Indica el valor del voltaje con el que opera el transductor. Es una característica importante para determinar la fuente de poder adecuada.

F) Masa sin cable. Este parámetro indica la cantidad de masa del transductor. Usualmente no influye en las lecturas realizadas, de lo contrario, el fabricante proporciona un factor para despreciar su efecto.

G) Técnica de montaje. Para evitar problemas durante la prueba experimental, es importante seleccionar la técnica de montaje más apropiada para el acelerómetro. Puede montarse el acelerómetro con un tornillo, imán o cera de abeja (Vishay, 2005).

2.13 Medición de temperatura

La temperatura es una medida del calor de las partículas en un cuerpo. Ésta influye notablemente en muchos fenómenos físicos y por ello existe un gran interés por registrar su magnitud en ciertas pruebas experimentales. El cambio de temperatura en los cuerpos genera fenómenos como la variación de volumen y la variación de la resistencia (en un conductor o en un compuesto de metal).

Para la medición de la temperatura se emplean equipos como termómetros, cámaras infrarrojas o sensores de cuarzo (NI, 2005). En pruebas experimentales el equipo más común para medir la temperatura es un transductor llamado termopar.

2.13.1 Termopar

Un termopar es un transductor que se utiliza para convertir la temperatura en voltaje. Es un circuito formado por dos metales diferentes (o aleaciones de metales) empalmados en una junta y entre ellos existe una diferencia de temperatura. Esta diferencia es detectada midiendo el cambio en el voltaje a través de los diferentes metales en el ensamble. Para su fabricación pueden utilizarse materiales tales como hierro-constantan, cobre-constantan o antimonio-bismuto y los metales normalmente se emplean en forma de alambre. En la figura 48 se muestra un ensamblaje de termopar.

El inventor del termopar fue Thomas Johann Seebeck, físico y médico alemán. Descubrió el efecto que se produce con el paso de la corriente a través de un circuito formado por dos metales distintos cuyas uniones se mantienen a temperaturas distintas y que es el fundamento de los termopares.

La magnitud del voltaje depende del material con que se hayan elaborado los conductores del termopar. Además, la lectura puede ser afectada por la contaminación, mecanismos extraños o choques. La degradación del termopar es inevitable con el tiempo y uso, por lo que debe establecerse un mantenimiento regular que incluya una calibración adecuada y un reemplazo eventual de los conductores (NI, 2005).



Figura 48. Ensamblaje de un termopar.

Como se mencionó anteriormente, existen diversos tipos de termopares dependiendo del tipo de material con que estén elaborados. En la tabla 2 se presentan los diferentes tipos de termopares, señalando su alcance de temperatura, materiales o aleaciones que los conforman y el material que se coloca por polo (+ Vs. -).

Tipo	Alcance Temperatura °C	Materiales y Aleaciones (+) Vs. (-)
Metal - Base		
E	-270 a 1 000	níquel - cromo Vs. cobre - níquel
J	-210 a 1 200	hierro Vs. cobre - níquel
T	-270 a 400	cobre Vs. cobre - níquel
K	-270 a 1 372	níquel - cromo Vs. níquel - aluminio
N	-270 a 1 300	níquel - cromo - silicio Vs. níquel - silicio - magnesio
Metal - Noble		
R	-50 a 1 768	platino - 13 % rodio Vs. platino
S	-50 a 1 768	platino - 10 % rodio Vs. platino
B	0 a 1 820	platino - 30 % rodio Vs. platino - 6 % rodio

Tabla 2. Tipos de termopares (Kooltrak, 2005).

Características de los termopares

Las características fundamentales que se deben conocer para el empleo adecuado de un termopar son las siguientes:

A) Rango de temperatura. Se refiere a los valores máximo y mínimo de lectura que pueden registrarse. Es necesario estimar estos valores para elegir el termopar más adecuado para la prueba experimental.

B) Resistencia química. En pruebas donde se va a trabajar en ambientes corrosivos es importante conocer la resistencia química del termopar.

C) Precisión. Es la más pequeña variación detectada de la magnitud de salida. Este parámetro se expresa un porcentaje del valor a plena escala.

D) Resistencia a vibración. Indica la capacidad que tiene el transductor de resistir el movimiento, sin alterar su precisión. Es importante conocer este parámetro si se va a instrumentar una prueba con vibraciones.

E) Tensión de alimentación. Indica el valor de voltaje con el que opera el transductor. Es una característica importante para determinar la fuente de poder adecuada.

2.14 Centro de adquisición de datos

Ya se han mencionado las características más importantes de los instrumentos a emplear en pruebas experimentales. Para realizar una medición, además de los transductores, es necesario contar con un equipo capaz de interpretar y registrar los valores de salida de los instrumentos de medición descritos en las secciones anteriores. Un centro de adquisición de datos es un equipo electrónico cuya función es el control y registro de una o varias variables de una prueba experimental.

Los centros de adquisición de datos surgen gracias a la necesidad de sustituir al hombre en tareas donde se realizan procesos de medición en forma periódica y durante lapsos de tiempo en los cuales no se ofrecería una observación confiable. Éste es un equipo que permite tomar señales físicas del entorno y convertirlas en datos que posteriormente se pueden procesar y presentar. En la figura 49 se aprecian los bloques que componen un centro de adquisición de datos:

- Señal física
- Transductor
- Acondicionamiento de señal
- Convertidor analógico-digital
- Salida

La señal física es la magnitud que se desea medir. En secciones anteriores ya se han mencionado los casos de deformación, desplazamiento, fuerza, presión, aceleración y temperatura. De igual modo, ya se mencionó en la sección 2.7 que el transductor es un elemento que convierte la magnitud física medida en una señal de salida (normalmente un diferencial de voltaje) que puede ser procesada por el centro de adquisición de datos.

El acondicionamiento de señal consiste en el proceso de filtrar y adaptar la señal proveniente del transductor a la entrada del convertidor analógico/digital. Esta adaptación suele ser doble y se encarga de adaptar el rango de salida del transductor al rango de entrada del convertidor. La adaptación entre los rangos de salida del transductor y el de entrada del

convertidor tiene como objetivo aprovechar al máximo el convertidor. La máxima señal de entrada al convertidor debe coincidir con la máxima salida del transductor.

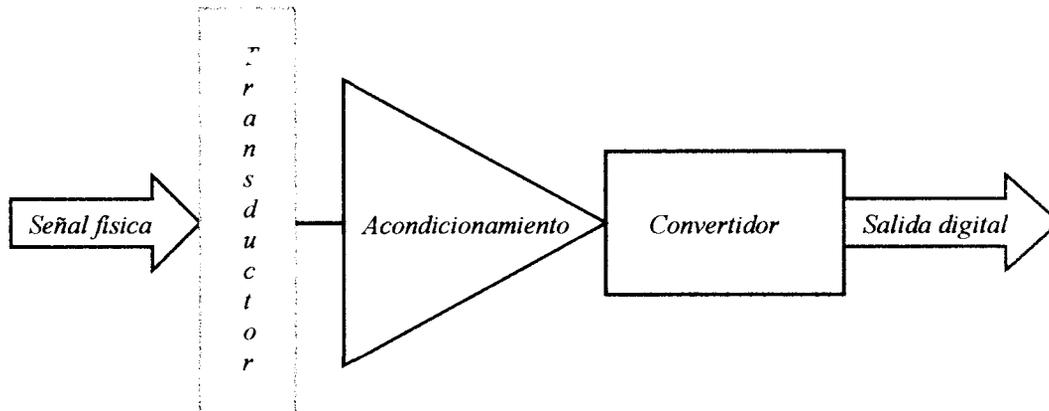


Figura 49. Estructura de un Centro de adquisición de datos (Modificado de NI, 2005).

El convertidor Analógico / Digital es un sistema que presenta en su salida una señal digital a partir de una señal analógica de entrada, (normalmente voltaje) realizando las funciones de cuantificación y codificación. La cuantificación implica la división del rango continuo de entrada en intervalos, de modo que para infinitos valores de la entrada la salida sólo puede presentar una serie determinada de valores.

La codificación es la etapa donde la señal se convierte al código binario, de modo que las etapas posteriores al convertidor puedan leer estos datos adecuadamente. Este paso puede hacer que se obtengan datos erróneos, por eso conviene adquirir un centro de adquisición de datos integral, que incluya todos los bloques necesarios y no dependa de una codificación externa.

La etapa de salida es el conjunto de elementos que permiten conectar el centro de adquisición de datos con el resto del equipo, y puede ser desde una serie de buffers digitales incluidos en el circuito convertidor, hasta un interfaz para conectar a una computadora, en el caso de centros de adquisición de datos comerciales (NI, 2005).

2.15 Instrumentación virtual

Los instrumentos de medición tradicionales poseen características invariables que son definidas desde el momento de su fabricación para realizar tareas específicas. Actualmente, la tecnología permite tener elementos de medición más precisos y más sencillos de personalizar, esto quiere decir que en los instrumentos de medición actuales, las funciones son definidas por quien las va a utilizar, no por quien lo fabrica, lo cual permite que sea más versátil el uso del instrumento. A lo anterior se le conoce como instrumentación virtual (NI, 2005).

Un instrumento virtual está conformado por una computadora del tipo industrial y una estación de trabajo, ambas equipadas con software avanzado y tarjetas de adquisición con controladores que realizan conjuntamente las mismas funciones que un instrumento tradicional. Una de las partes más importantes de este instrumento, es el software. Si la herramienta de software es apropiada se pueden crear aplicaciones de manera eficiente integrando y diseñando las rutinas de un proceso particular. Así mismo, se puede definir cómo y cuándo la aplicación adquiere datos desde el transductor, cómo los procesa, manipula, almacena los datos y presenta los resultados al usuario. Dentro de los instrumentos virtuales que actualmente tienen mayor empleo actualmente se encuentra el LabVIEW que necesita tarjetas de adquisición de datos y una estación de trabajo (PXI) para poder ser utilizado.

2.15.1 LabVIEW

Es un software flexible de desarrollo gráfico que posee funciones integradas para realizar adquisición de datos, control de instrumentos, análisis de mediciones y presentaciones de datos. Puede ser utilizado fácilmente para crear interfases de usuario con objetos ya construidos y después especificar la función del sistema, ya que se puede conectar con todo tipo de hardware: desde instrumentos de escritorio hasta controladores programables (NI, 2005). Una manera sencilla de visualizar cómo funciona el LabVIEW se aprecia en la figura 50, donde se muestra que la parte principal de un instrumento virtual es el software; sin embargo, éste debe estar dentro de un centro de adquisición de datos (PXI) el cual, a su vez, debe registrar información que se adquiere mediante la tarjeta de adquisición de datos.

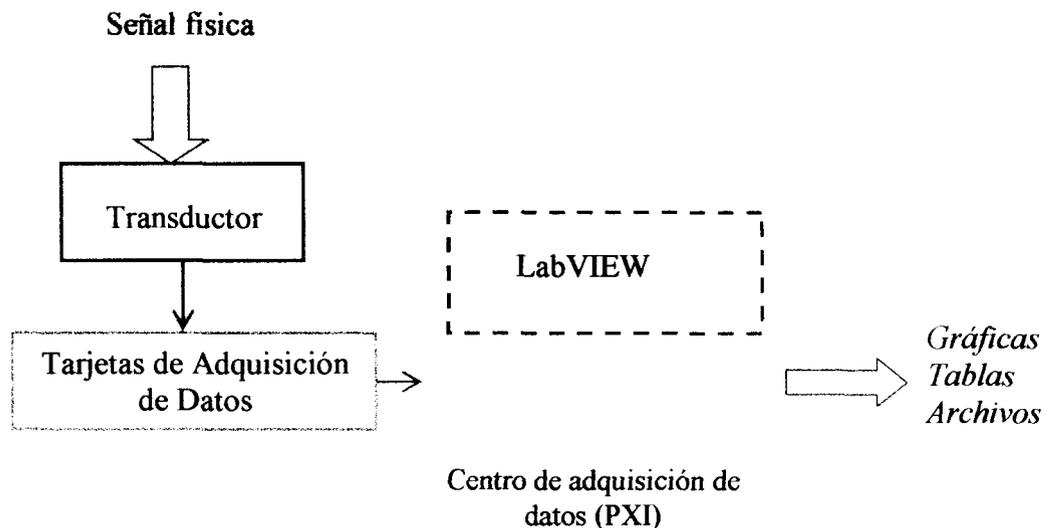


Figura 50. Funcionamiento del software LabVIEW.

El proceso de manejo de Labview comienza con la adquisición de datos, la cual se puede realizar desde cualquier sistema de hardware, ya que lo versátil del software lo permite. Al conectar un dispositivo adecuado a una computadora portátil, se puede trabajar

directamente con el programa y así comenzar a realizar las mediciones deseadas. Un centro de adquisición de datos es en realidad una estación de trabajo donde se conectan tarjetas de adquisición de datos. Las tarjetas de adquisición son muy variadas (para galgas extensométricas, acelerómetros, LVDT's, termopares y celdas de carga, entre otras). En la figura 51 se muestra un centro de adquisición de datos con una tarjeta de adquisición.



Figura 51. Centro de adquisición de datos con una tarjeta de adquisición.

En la figura 52 se muestra un instrumento de control al cual se le pueden conectar centros de adquisición de datos, memorias USB y otro tipo de instrumentos. Cuando se emplea software especializado para manejar los centros de adquisición o los de control, al conjunto se le conoce como un sistema de instrumentación virtual. Este sistema tiene la ventaja de transportar la información de un formato a otro. De esta manera la información se conserva pero se puede manejar en diferentes formatos, tales como gráficas, tablas o archivos de datos. Para trabajar eficientemente con sistemas de instrumentación virtual, es necesario conocer y manejar el software correspondiente. Ya se mencionó que LabVIEW es un software de desarrollo gráfico que posee funciones integradas para realizar adquisición de datos, control de instrumentos, análisis de mediciones y presentaciones de datos. El empleo adecuado de LabVIEW permite adquirir datos y procesarlos mediante instrumentos virtuales desarrollados por el usuario.

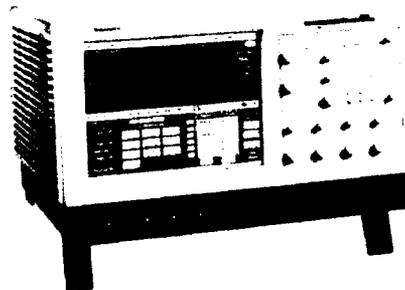


Figura 52. Instrumento de control (NI, 2005).

Características de LabVIEW

Las características principales de este software son las siguientes:

A) Lenguaje especializado para medición, control y automatización. A diferencia de los lenguajes de propósito general, LabVIEW provee funcionalidad específica para que pueda acelerar el desarrollo de aplicaciones de medición, control y automatización.

B) Ambiente de desarrollo intuitivo. LabVIEW posee herramientas para crear aplicaciones sin necesidad de escribir un código de texto. Con este software se manejan objetos ya contruidos para rápidamente crear interfases de usuario. Después se especifica la funcionalidad del sistema armando diagramas de bloques (NI, 2005).

C) Integración con instrumentos y dispositivos de medición. LabVIEW se puede conectar de forma virtual con todo tipo de hardware incluyendo instrumentos de escritorio, tarjetas de adquisición, controladores, computadoras portátiles y centros de adquisición de datos, entre otros.

D) Desarrollo en un entorno completo. El software cuenta con capacidad de adquisición, análisis y presentación de datos, por lo que estos pueden presentarse en diferentes formas (gráficas, tablas), en tiempo real. El código generado es reutilizable en otros proyectos y se ejecuta a velocidades de código compilado. También se pueden crear ejecutables autónomos o bibliotecas compartidas (NI, 2005)

2.16 Investigación sobre la instrumentación del distribuidor vial San Antonio.

Tras finalizar la obra del distribuidor vial San Antonio, el gobierno del Distrito Federal solicitó al instituto de Ingeniería de la UNAM la realización de tres pruebas experimentales con la finalidad de corroborar las hipótesis de diseño, detectar fallos y evaluar posibles ajustes a los criterios de diseño en futuros proyectos (IMCYC, 2005). En la figura 53 se aprecia una imagen del distribuidor vial San Antonio.



Figura 53. Distribuidor vial San Antonio (IMCYC, 2005).

Para determinar algunas propiedades básicas del comportamiento estructural del distribuidor vial y obtener la evaluación deseada, se realizaron tres tipos de pruebas de campo:

- Pruebas de vibración ambiental en tres sitios, con longitudes entre 35 y 200 m.
- Pruebas de tracción en una columna esbelta
- Pruebas de carga estáticas y dinámicas en un tramo de 35 m de longitud

Las pruebas se aplicaron en los tres sitios indicados en la figura 54 ubicados en el tramo I del distribuidor vial y están estructurados con vigas tipo cajón apoyadas sobre columnas.

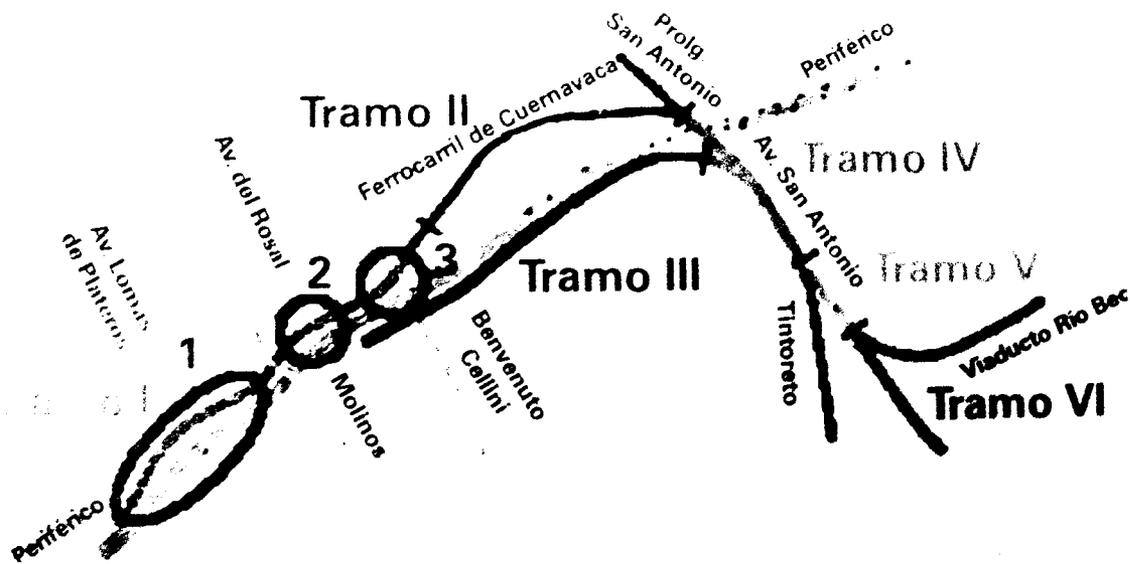


Figura 54. Localización de los sitios seleccionados para realizar pruebas (IMCYC, 2005).

A) Pruebas de vibración ambiental

En éstas pruebas se midieron las aceleraciones generadas por la actividad normal en los tres sitios seleccionados de la estructura, identificando las principales frecuencias de vibración en las direcciones vertical, transversal y longitudinal. Se emplearon ocho acelerómetros de alta resolución que fueron colocados en diferentes puntos de observación en la estructura. Las señales de estos transductores fueron capturadas con un centro de adquisición de datos con un amplificador para lograr registrar digitalmente las señales de pequeña amplitud (ver figura 55). Los registros de las aceleraciones medidas en campo fueron analizados para estimar las principales propiedades dinámicas de la estructura.

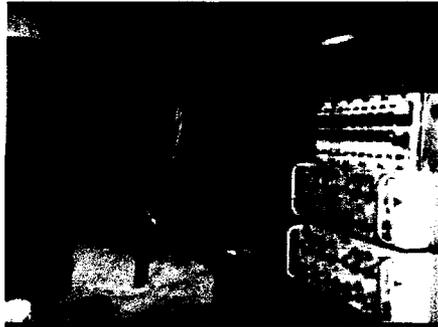


Figura 55. Centro de adquisición de datos empleado (IMCYC, 2005).

B) Pruebas de tracción

En una columna esbelta del sitio 2 (ver figura 54) se aplicó, mediante poleas, un incremento progresivo de carga (de cinco toneladas) hasta alcanzar la magnitud deseada. Una vez alcanzada la carga deseada, ésta se liberó para que la estructura vibrara libremente. Los desplazamientos y las aceleraciones que se produjeron fueron medidos con LVDT's y acelerómetros instalados en puntos previamente identificados. En la figura 56 se aprecia el montaje de un LVDT en la columna ensayada.

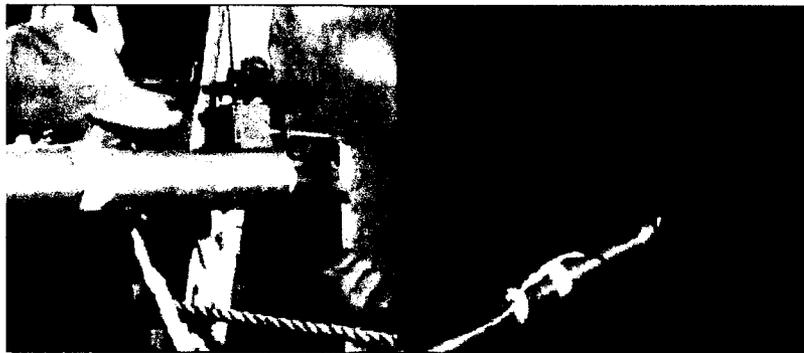


Figura 56. Montaje de un LVDT (IMCYC, 2005).

C) Pruebas con cargas estáticas y dinámicas

En el sitio dos (ver figura 54) también se efectuaron pruebas bajo cargas vehiculares de magnitudes extremas. Para estas pruebas se emplearon cinco camiones. Cuatro de ellos se cargaron con pesos entre 55 y 60 toneladas, y uno con 22 toneladas, y se colocaron en las posiciones más desfavorables sobre el puente, aumentando progresivamente el número de camiones hasta alcanzar una carga máxima de 227 toneladas. La carga se colocó tanto en forma simétrica sobre los dos carriles, como asimétricamente, es decir, toda la carga sobre un solo carril. Se midieron las deformaciones de la estructura con los camiones parados sobre el tramo de vía en cuestión; después, se efectuaron mediciones con los cinco camiones circulando por el puente a diferentes velocidades (10 a 50 km/h) y colocando, en unos casos, topes de cinco cm de peralte. La comparación de las deformaciones medidas ante cargas estáticas y dinámicas permitió evaluar los efectos dinámicos y de impacto que generan los camiones. La configuración deformada lateral de la estructura se midió con transductores de

desplazamiento del tipo LVDT (ver figura 57) y con ayuda de equipo topográfico (IMCYC, 2005).

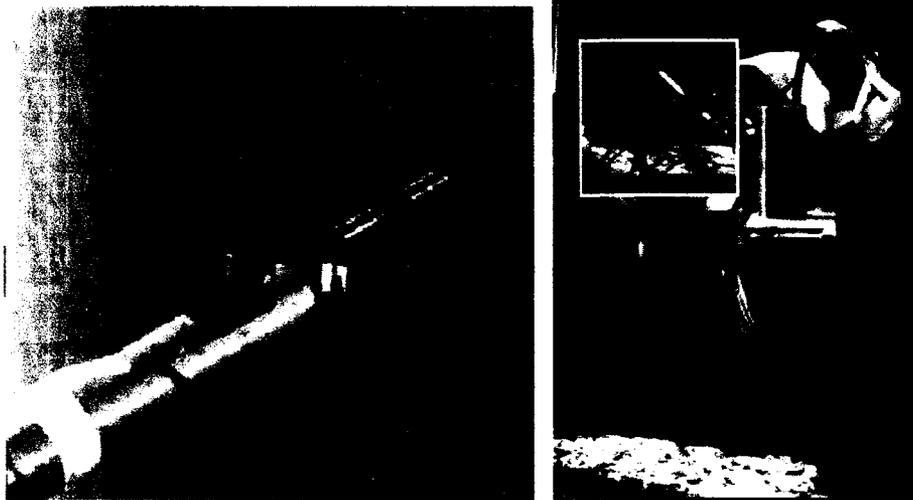


Figura 57. LVDT's empleados para medir el desplazamiento (IMCYC, 2005).

Puede apreciarse que se aplicaron los transductores de acuerdo a la necesidad del proyecto. Al requerir mediciones de desplazamiento y aceleración, los transductores más adecuados y que finalmente se emplearon fueron los LVDT's y acelerómetros. Para incrementar la señal de salida de los acelerómetros se conectó un amplificador al centro de adquisición de datos. Este proyecto ejemplifica lo descrito en los puntos anteriores e ilustra el montaje de LVDT's y acelerómetros.

2.17 Listado de algunas estructuras instrumentadas.

Es importante mencionar la instrumentación de algunos proyectos externos, con la finalidad de mostrar diferentes aplicaciones de los instrumentos de medición discutidos anteriormente. Se presentan las siguientes estructuras:

1. Aeropuerto internacional de Denver: La instrumentación de este proyecto consiste en dos tipos de sensores embebidos en el pavimento. Los tipos de sensores de este proyecto fueron divididos en dinámicos y estáticos. Los sensores dinámicos eran acelerómetros que registraban la respuesta del pavimento al tráfico de aeronaves con una velocidad de recolección de 100 a 1000 Hz. Los sensores estáticos se emplearon para medir la respuesta del pavimento a las condiciones ambientales (temperatura y humedad) con una velocidad de recolección de un dato por hora. Como sensores estáticos se emplearon galgas extensométricas para registrar la deformación del pavimento, LVDT's para registrar los desplazamientos verticales y galgas especiales para la medición de humedad y temperatura.

2. Puentes en la ruta 273 en Saco, Montana: Para este proyecto se instrumentaron tres puentes de reciente construcción. Aunque la configuración de los puentes es la misma, cada uno se construyó con diferente sistema de piso, por lo que se implementó la instrumentación de cada puente con la finalidad de evaluar el desempeño de los tres sistemas de piso ante la acción de la carga vehicular y las condiciones ambientales.

El comportamiento de los sistemas de piso se evaluó con pruebas de carga viva controlada donde vehículos de características conocidas se manejaron sobre los puentes y las deflexiones y deformaciones primarias se registraron por medio de LVDT's. El resto del proyecto consiste en realizar la misma prueba en intervalos de dos años con la finalidad de evaluar el desempeño de cada sistema de piso tras el efecto de cargas acumuladas y efectos ambientales.

3. *Nave industrial en Middlesex County, Nueva Jersey*: Una empresa privada patentó un sistema de inyección de aire y extracción de compuestos orgánicos volátiles del suelo con la finalidad de evitar formaciones geológicas que pongan en riesgo la seguridad de las estructuras construidas sobre él. Para validar su sistema, se realizó el proceso de inyección y extracción en el terreno de una nave industrial sin actividad en Middlesex County, Nueva Jersey. Se pretendía evaluar si el proceso de inyección y extracción, al generar movimientos en el suelo, aumentaba considerablemente los esfuerzos de diseño de la estructura metálica. Para evaluar dichos esfuerzos y desplazamientos máximos de la estructura, se instrumentaron los elementos críticos con galgas extensométricas y LVDT's. La prueba consistió en realizar el procedimiento de inyección y extracción y el registro de las deformaciones unitarias y desplazamientos en la estructura.

CAPÍTULO 3 Diseño de experimentos

3.1 Introducción

En el capítulo anterior se discutieron las características principales de los equipos de medición que se emplean comúnmente en pruebas experimentales. De igual forma, se han mencionado los parámetros que se registran usualmente en pruebas experimentales. Antes de instrumentar una prueba, es necesario elegir las variables de interés y evaluar los puntos del espécimen donde se requieren datos experimentales. Una vez que se conocen las variables y el número de puntos a registrar, se procede a la selección de la instrumentación adecuada.

La selección e implantación de la instrumentación en cada prueba realizada depende de las características de cada equipo. El equipo debe ser adecuado y cumplir con las necesidades de cada proyecto. Se deben considerar factores como el espacio, el tiempo de lectura y la facilidad de transporte, entre otros. En este capítulo se describe la instrumentación implementada en los proyectos de “Evaluación analítica y experimental de un domo a escala 1:0.6 construido en mesa vibratoria en los laboratorios de Texas A&M” y “Evaluación analítica y experimental de un domo a escala construido en los laboratorios del ITESM, sujeto a carga gravitacional”

3.2 Evaluación analítica y experimental de un domo a escala 1:0.6 construido en mesa vibratoria en los laboratorios de Texas A&M.

En el Tecnológico de Monterrey se ha desarrollado el sistema constructivo “Tecnodomo”, para uso de vivienda emergente, clínica de campo, escuela rural entre otros (Yeomans et al, 2004). El “Tecnodomo” es un domo fabricado con la técnica de ferrocemento, formado a base de paneles prefabricados curvos de acero tubular cubiertos con un mortero ligero (ver figura 58). Con la finalidad de estudiar la respuesta sísmica del sistema constructivo “Tecnodomo”, se realizó un estudio experimental de un domo a escala 1:0.6 construido en mesa vibratoria en el laboratorio de estructuras de Texas A&M University.

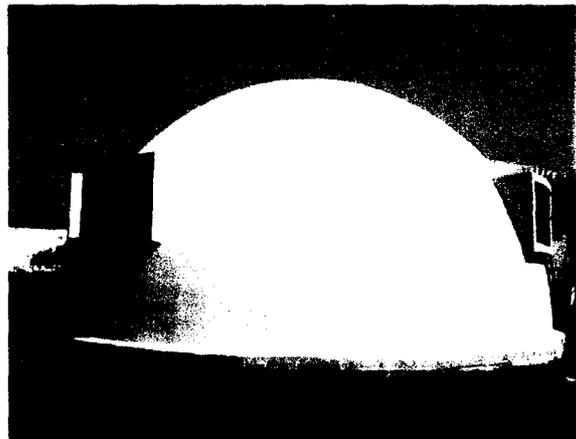


Figura 58. Tecnodomo (Yeomans et al, 2004)

La evaluación analítica se realizó mediante la técnica de elemento finito para un modelo a escala 3/5 con un diámetro de 3.60 m. sujeto a los sismos de Kobe, Northridge, Loma Prieta y México 1985. Para la evaluación experimental, se construyó una mesa vibratoria de 4.0 m. por 4.0 m. de un grado de libertad en la Universidad de Texas A&M, y sobre ella se fabricó un Tecnodomo a escala 3/5, utilizando técnicas de similitud y semejanza para convertir los resultados del modelo a resultados del prototipo o estructura real (Nungaray et al, 2005).

3.2.1 Instrumentación del proyecto.

Una vez definida la dimensión del domo a ensayar, se procedió a su construcción. En Monterrey se fabricaron 9 paneles que se agruparon en tres “gajos” que serían transportados y unidos en el laboratorio de estructuras de la Universidad de Texas A&M. La figura 59 muestra la estructura completa. Para construir la estructura se emplearon perfiles tubulares de $\frac{3}{4}$ ” x $\frac{3}{4}$ ” de calibre 14.

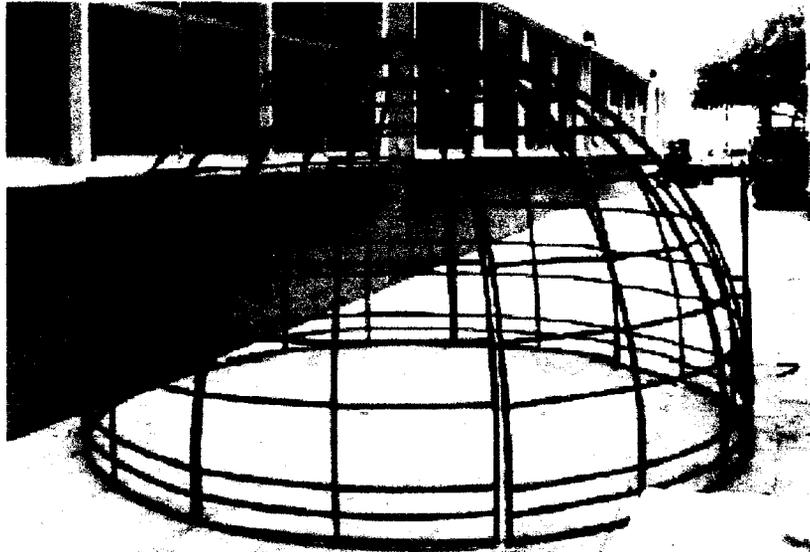


Figura 59. Estructura completa del modelo (Yeomans et al, 2005b).

Tras un análisis preliminar del modelo se eligieron los puntos de interés de los marcos metálicos donde se requería conocer los valores de esfuerzo (Yeomans et al, 2005b). En la figura 60 se puede apreciar un diagrama con la ubicación de los puntos críticos en la estructura. Dada la necesidad de medir esfuerzos y el tipo de estructuración (metálica), se seleccionaron galgas extensométricas CEA-06-250UW-120 para ser cementadas en los puntos críticos de los marcos de acero.

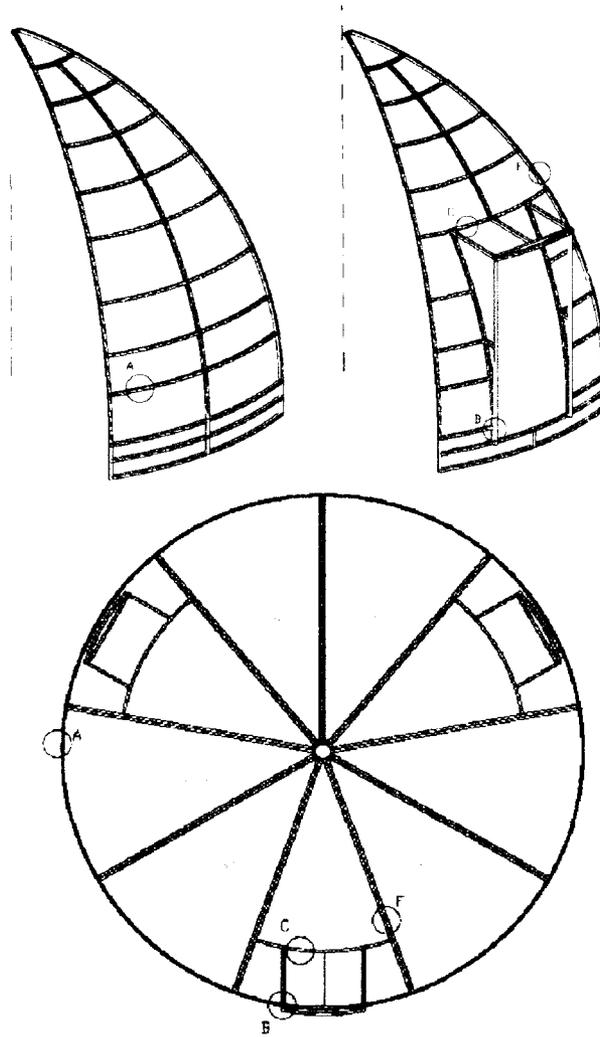


Figura 60. Puntos de interés para determinar el valor de esfuerzo (Yeomans et al, 2005b).

Una vez elegido el tipo de galga a cementar, se procedió a adquirir el equipo y material necesarios para la cementación. En las figuras 61 y 62 se muestran el material y equipo empleado.

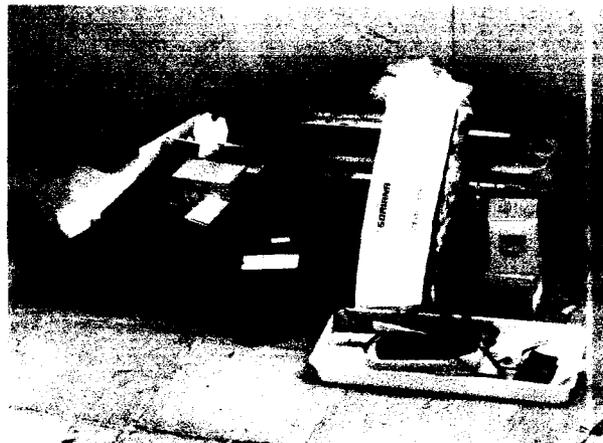


Figura 61. Material empleado para cementar las galgas.



Figura 62. Equipo empleado para cementar las galgas.

Previo a la prueba en la Universidad de Texas A&M, se trabajó en las instalaciones del laboratorio de estructuras del ITESM. Por las dimensiones del modelo a instrumentar y requerimientos de iluminación, ventilación y espacio para maniobrar se eligió trabajar al aire libre, cuidando todos los aspectos de seguridad e higiene. En la figura 63 se muestra la zona de trabajo.

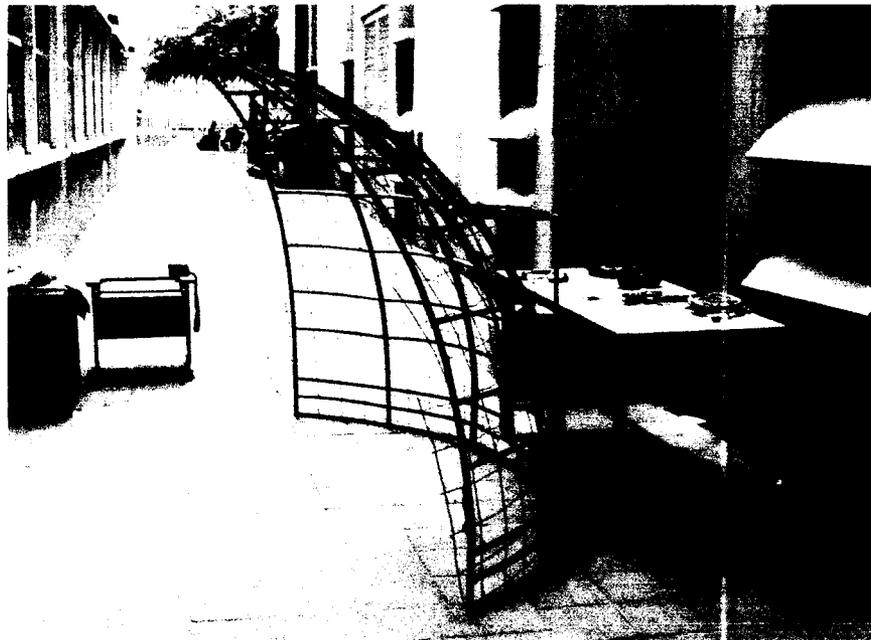


Figura 63. Zona de trabajo para la cementación.

En las figuras 64 a 68 se ilustra el proceso de pegado. Se siguió el proceso descrito en el capítulo anterior.



Figura 64. Limpieza y lijado de la superficie.

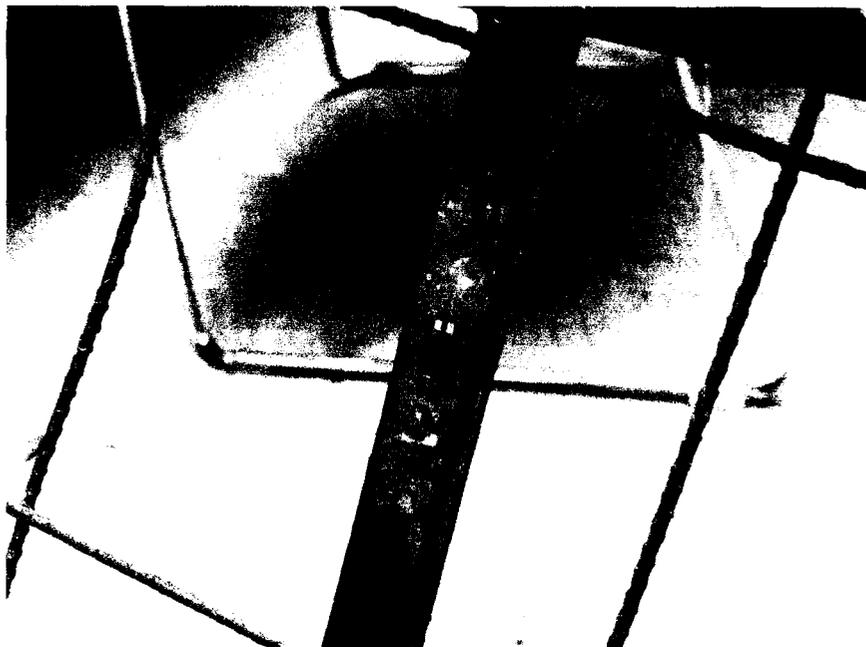


Figura 65. Acondicionamiento, neutralización y pegado.

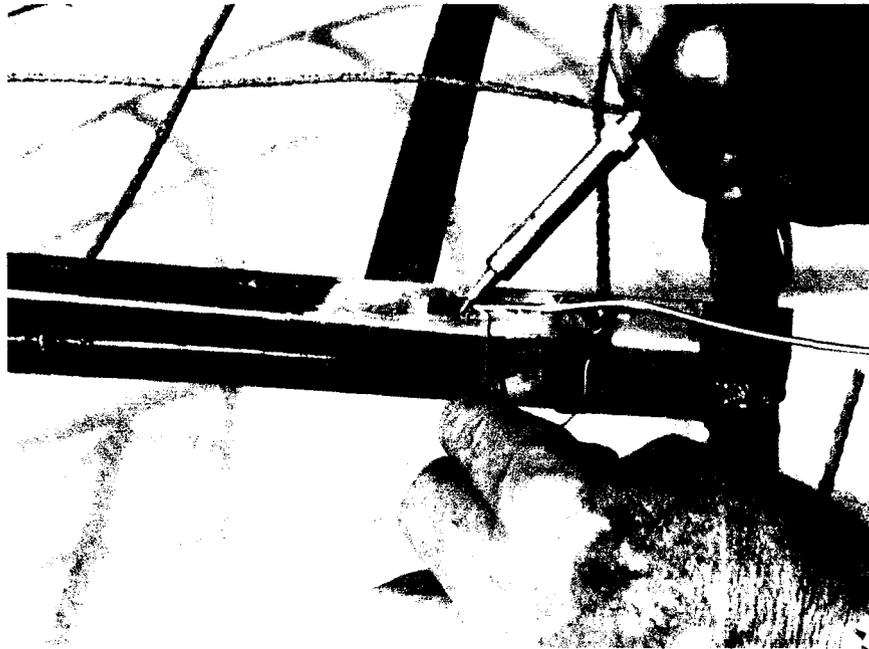


Figura 66. Soldadura de terminales.



Figura 67. Verificación de funcionamiento.

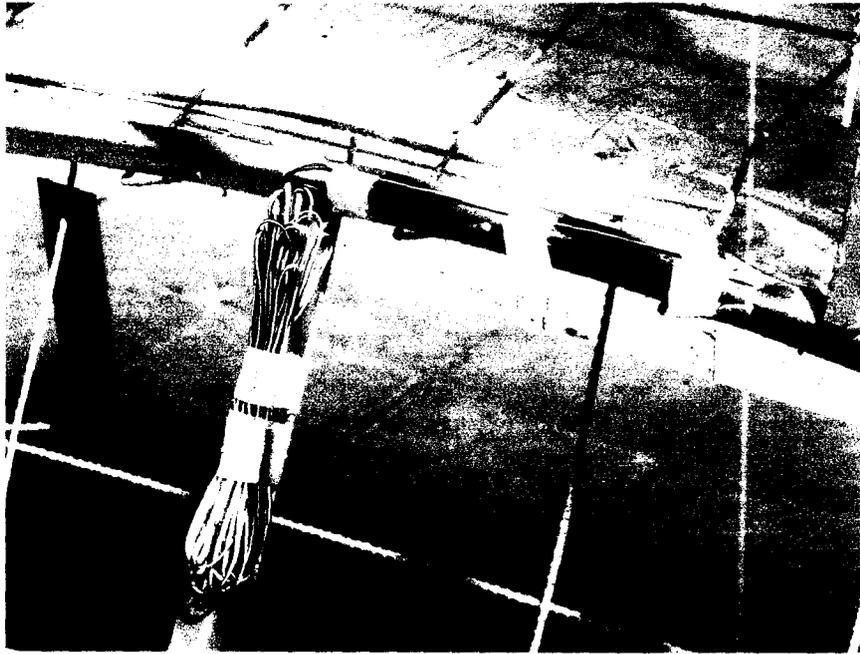


Figura 68. Galga cementada y protegida para transporte.

Una vez cementadas las galgas y protegidas para su transporte (figura 68), la estructura metálica se llevó al laboratorio de estructuras de la Universidad de Texas A&M en donde se procedió a terminar la construcción del modelo. La base de cimentación de concreto constó de una superficie circular de 198 cm de radio exterior, radio interior de 138 cm de radio y espesor de 6 cm. Para fijar la cimentación a la placa de la mesa se utilizaron doce tornillos de acero A-325 de 1.27 cm de diámetro espaciados uniformemente (Yeomans et al 2005b). La figura 69 muestra la colocación de la estructura metálica dentro del anillo de cimentación, así como la cimbra de ésta. Tras ensamblar la estructura metálica se procedió a colar concreto ($f'c = 150 \text{ kg/cm}^2$) en la cimentación. En los paneles se colocó malla electrosoldada y sobre ésta, malla plafonera; ambas mallas sujetas por medio de alambres. Ya que la cimentación estaba lista y las mallas colocadas, se procedió a zarpear los paneles con ferrocemento. En la figura 70 se aprecia la vista interior del domo durante la fase de zarpeo, así como una de las galgas que se cementaron previamente. En la figura 71 se muestra el domo terminado.

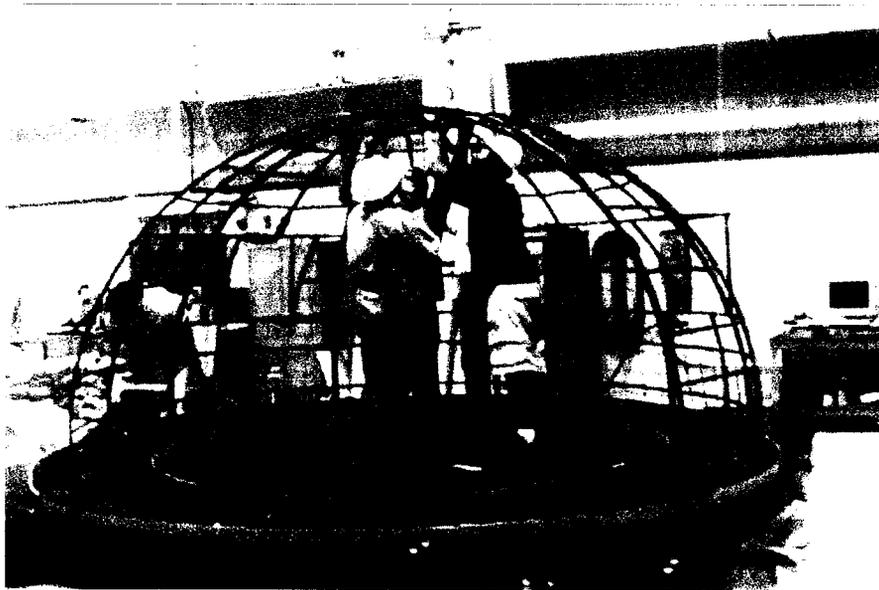


Figura 69. Montaje de la estructura metálica y cimbra para la base de cimentación (Yeomans et al, 2005)

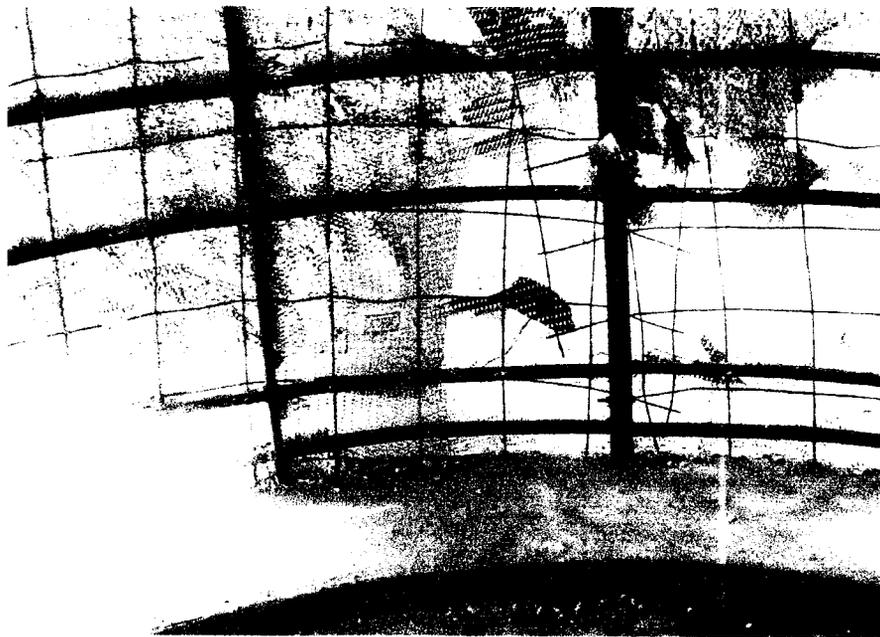


Figura 70. Zarpeo sobre la estructura instrumentada.

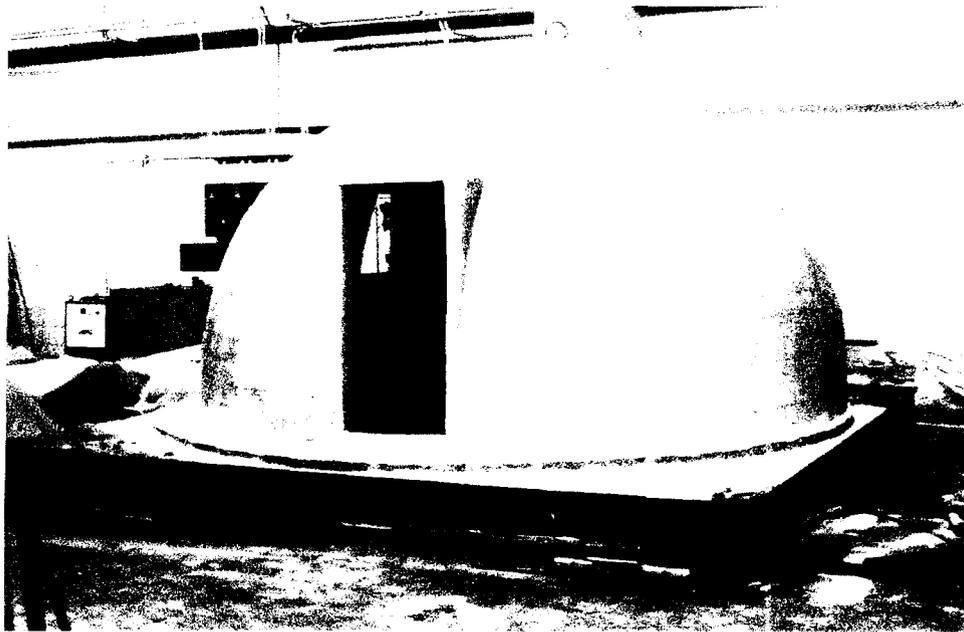


Figura 71. Domo terminado (Yeomans et al 2005b).

Otra magnitud de interés para esta prueba era el desplazamiento, pues era necesario corroborar el desplazamiento real de la mesa vibratoria. Se estimaron los valores de desplazamiento máximo en ambos sentidos y las condiciones de la prueba. Una vez conocidos estos parámetros, se decidió instrumentar la estructura con tres LVDT's modelo Omega LD 3100-100. Se eligieron tres puntos críticos y significativos para realizar una comparativa con los resultados obtenidos por la modelación de elementos finitos. El primer LVDT se situó en la cima del domo para determinar los máximos desplazamientos en la estructura; un segundo LVDT se colocó a 50 cm de su base de cimentación (de acuerdo a los desplazamientos críticos estudiados en el modelo de elemento finito); y el tercer LVDT en la placa de la mesa vibratoria para determinar los desplazamientos relativos de los dos primeros con respecto a la mesa vibratoria. Los tres LVDT's se colocaron paralelos al eje de desplazamientos y sujetos a pequeñas placas que se soldaron previamente a la estructura metálica y que facilitaron el montaje de los transductores. En la figura 72 se muestra una placa de montaje y en la figura 73 se muestran los LVDT's instalados en la mesa y a 50 cm de la base.



Figura 72. Placa de montaje para LVDT.

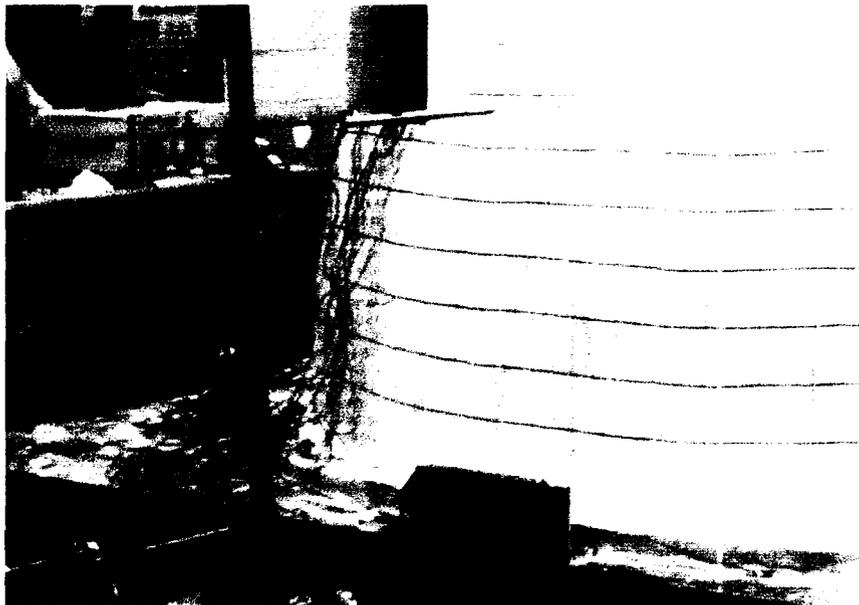


Figura 73. LVDT's colocados en la mesa y a 50 cm de la base.

El equipo utilizado para la recolección de información tanto de los transductores de desplazamientos como de las galgas extensométricas fue un sistema de adquisición de datos de sesenta y cuatro canales modelo NI PXI-1011. Se realizó un programa en Labview para proporcionar el voltaje de entrada adecuado a los transductores, leer y almacenar la información de los transductores durante la prueba. En el anexo tres se muestra un manual para programar en Labview, basado en la experiencia adquirida durante el periodo de ejecución de los proyectos apoyados por este trabajo y en documentación de National Instruments.

La carga dinámica impuesta al tecnodomo consistió en una serie de funciones senoidales de desplazamiento así como sismos reales. Los sismos incluidos fueron los de Colima (México) 2003, Kobe 1995, Northridge 1994, Loma Prieta 1989 y México (D.F) 1985. Para las ondas senoidales se usó una amplitud de 25.4 mm con frecuencias de 1, 1.5, 2, y 2.5 Hz. Primero se aplicaron los sismos y una vez terminada la aplicación de ellos se procedió a cargar al domo con las ondas senoidales de desplazamiento (Yeomans et al, 2005b)

3.3 Evaluación analítica y experimental de un domo a escala construido en los laboratorios del ITESM, sujeto a carga gravitacional.

En el Tecnológico de Monterrey se ha desarrollado un sistema constructivo "Tecnodomo", para uso de vivienda emergente, clínica de campo, escuela rural entre otros (Nungaray et al, 2004). El "Tecnodomo" es un domo fabricado con la técnica de ferrocemento, formado a base de paneles prefabricados curvos de acero tubular cubiertos con un mortero ligero a base de anhidrita (ver figura 74). Con la finalidad de estudiar la respuesta a carga gravitacional del sistema constructivo "Tecnodomo", se realizó un estudio experimental de un domo construido en los laboratorios del ITESM.

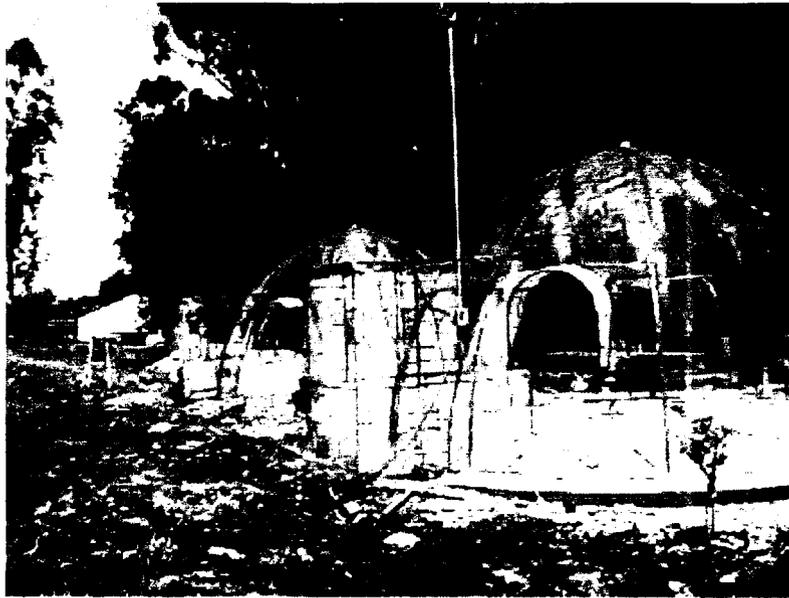


Figura 74. Tecnodomo (Yeomans et al, 2004).

La evaluación analítica se realizó previamente en las oficinas del Centro de Diseño y Construcción. Para la evaluación experimental, se diseñó una estructura metálica que permitiera aplicar carga gravitacional y repartirla uniformemente sobre el domo. En la figura 75 se aprecia el domo y la estructura metálica que finalmente se construyó para aplicar y repartir la carga.

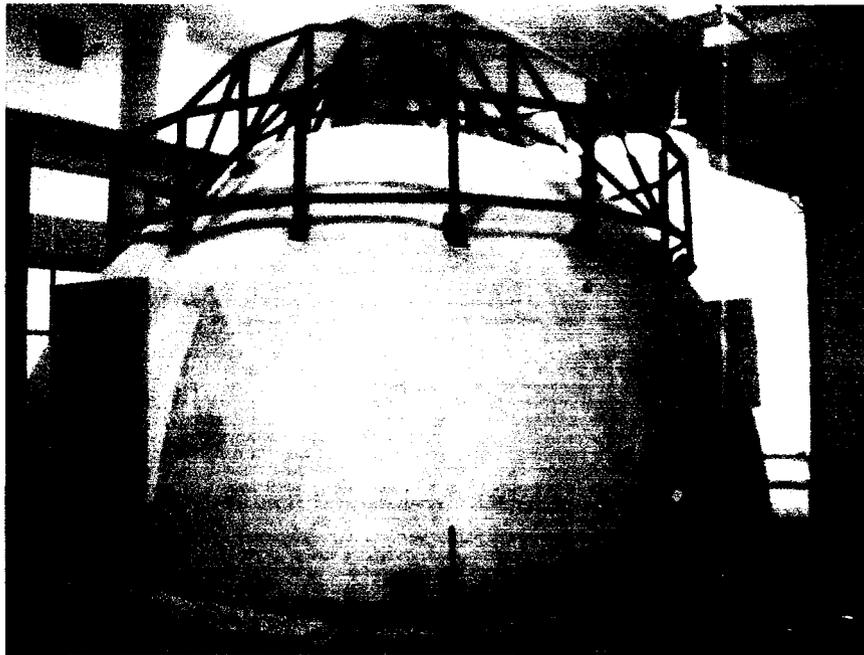


Figura 75. Domo y estructura para aplicar y distribuir carga.

3.3.1 Instrumentación del proyecto.

Una vez construida la estructura para aplicar carga, se procedió a su instrumentación. Tras un análisis de la estructura, se eligieron los puntos de interés de los marcos metálicos donde se requería conocer los valores de esfuerzo. Dada la necesidad de medir esfuerzos y el tipo de estructuración (metálica), se seleccionaron galgas extensométricas CEA-06-250UW-120 para ser cementadas en los puntos críticos de los marcos de acero.

La estructura a ensayar ya estaba construida, por lo que la fase de instrumentación inició con perforaciones (evitando dañar la estructura) en los tres puntos de interés con la finalidad de exponer los perfiles tubulares. En la figura 76 se muestra una de las perforaciones realizadas.



Figura 76. Perforación realizada para exponer la estructura metálica.

Se trabajó en las instalaciones del laboratorio de estructuras del ITESM. Por la contaminación del espécimen (polvo y óxido de los perfiles tubulares que se aprecian en la figura 77), se cementaron las galgas extremando las medidas de higiene para evitar errores durante la cementación y soldadura. Para cementar las galgas se siguió el procedimiento descrito en el capítulo 2 e ilustrado en la sección anterior. En la figura 78 se presenta una de las galgas cementada, protegida y lista para trabajar. El cableado era un factor a cuidar, pues se requerían 10 metros de cable para conectar la galga al centro de adquisición de datos, y era importante que los días previos a la prueba el cableado estuviera seguro (ver figura 79).



Figura 77. Contaminación a limpiar en la estructura metálica.

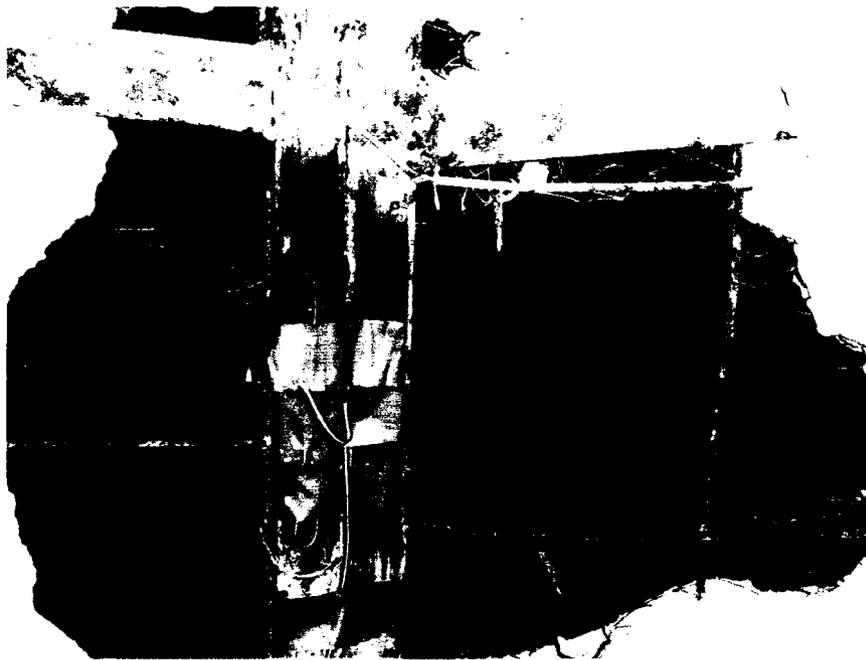


Figura78. Galga cementada, protegida y lista para trabajar.



Figura 79. Cableado de una de las galgas.

Otra magnitud de interés para esta prueba era el desplazamiento, pues se requería conocer el desplazamiento vertical en la cresta del domo, así como los posibles desplazamientos laterales en los diferentes puntos de interés. Una vez conocidos estos parámetros, se decidió instrumentar la estructura con tres LVDT's modelo Omega LD 3100-100. Se eligió un punto lo más cercano posible a la cima del domo (para registrar el desplazamiento vertical) y dos puntos significativos a un tercio de la altura del domo para registrar posibles lecturas de desplazamiento horizontal. Los tres LVDT's se colocaron paralelos al eje de desplazamiento requerido y sujetos a tuercas que se instalaron en el domo para permitir el montaje de estos transductores. En las figuras 80 y 81 se muestra el montaje de un LVDT lateral. En la fotografía 82 se aprecia el LVDT que se instrumentó en la cima del domo, mientras que en la figura 83 se observa el domo instrumentado con los dos LVDT's laterales.

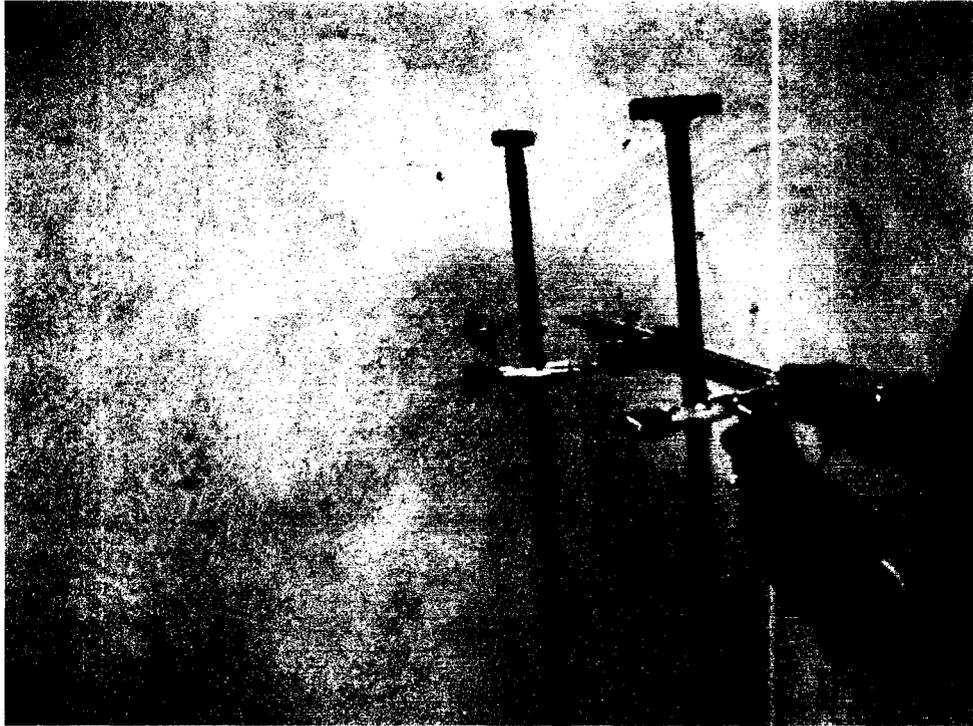


Figura 80. Montaje de un LVDT en una de las tuercas instaladas.

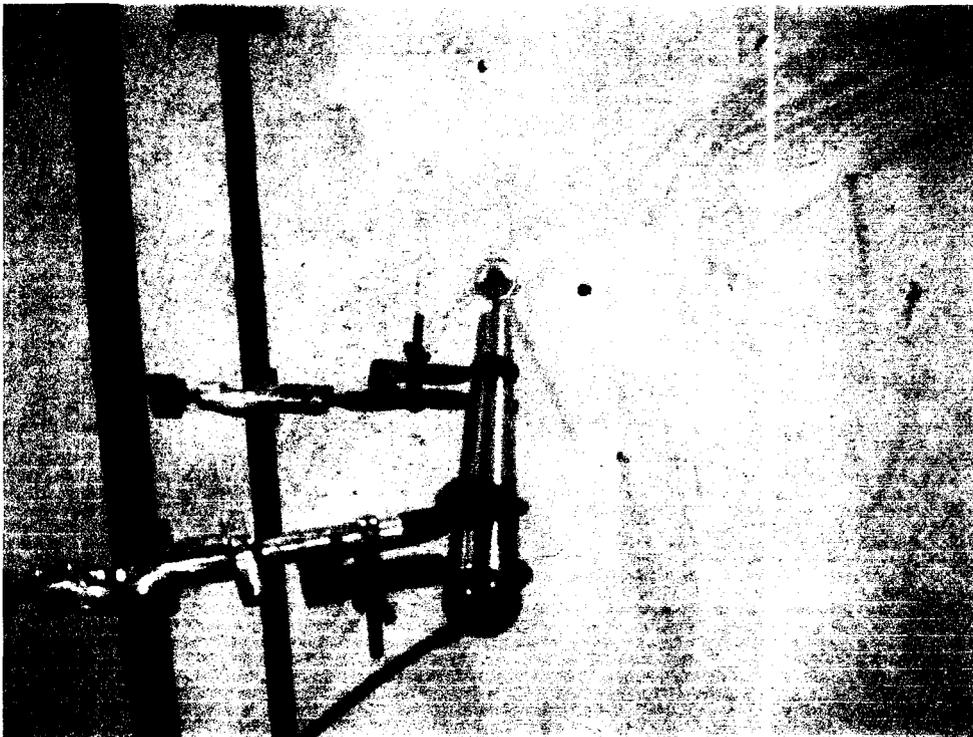


Figura 81. LVDT instalado.

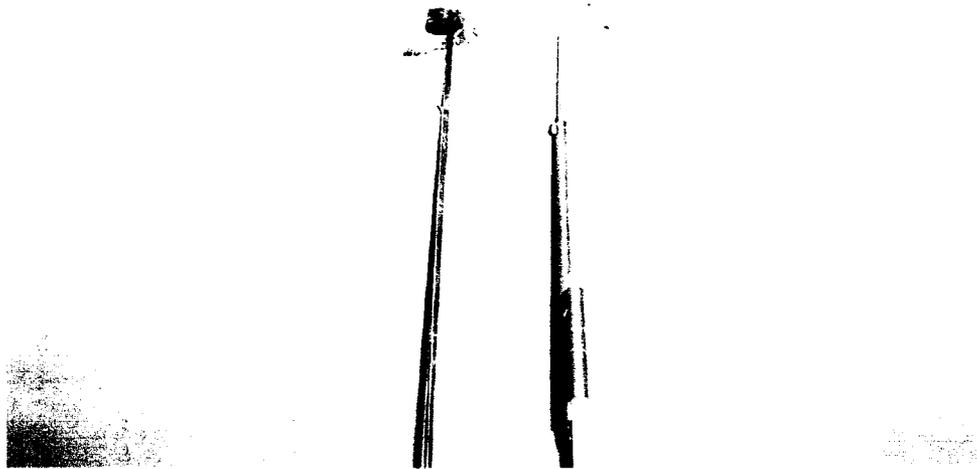


Figura 82. LVDT montado verticalmente en la cima del domo.

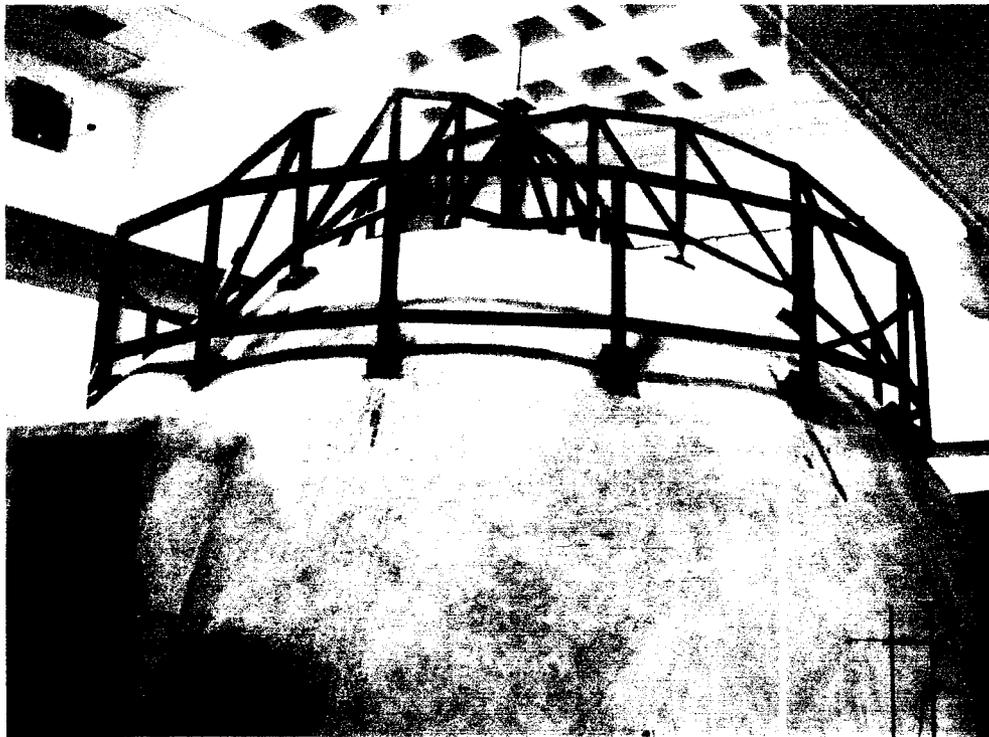


Figura 83. Domo instrumentado con transductores de desplazamiento.

El equipo utilizado para la recolección de información tanto de los transductores de desplazamiento como de las galgas extensométricas fue un sistema de adquisición de datos de sesenta y cuatro canales modelo NI PXI-1011 (ver figura 84). Para la lectura de las galgas extensométricas se empleó un sistema de adquisición de datos Vishay P-3000 (ver fotografía 26).



Figura 84. Sistemas de adquisición de datos NI PXI-1011 (izq.) y Vishay P-3000 (der.).

Se realizó un programa en LabVIEW para proporcionar el voltaje de entrada adecuado a los transductores de desplazamiento, leer y almacenar la información durante la prueba. En la figura 85 se aprecia la salida gráfica de dicho programa. En el anexo tres se muestra un manual para programar en LabVIEW, desarrollado durante el periodo de ejecución de los proyectos apoyados por este trabajo.

La carga gravitacional impuesta al tecnodomo consistió en dos cables sujetos a la cima del domo en un extremo y, por el otro extremo, a un gato debajo de la losa de reacción del laboratorio de estructuras del ITESM. En la figura 86 se ilustra el sistema de aplicación de carga.

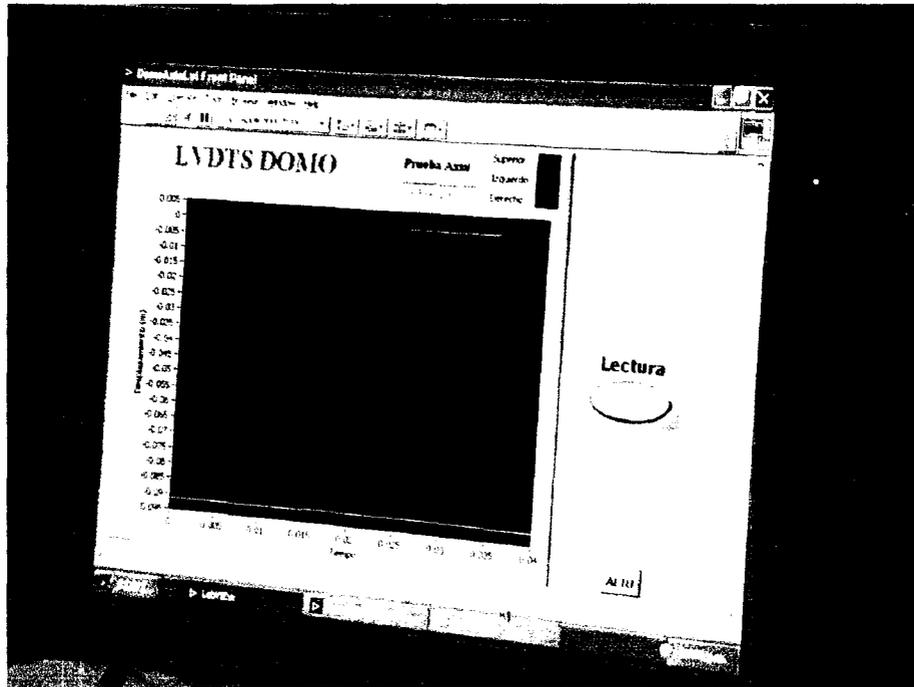


Figura 85. Salida grafica del programa en Labview desarrollado para medir los desplazamientos.

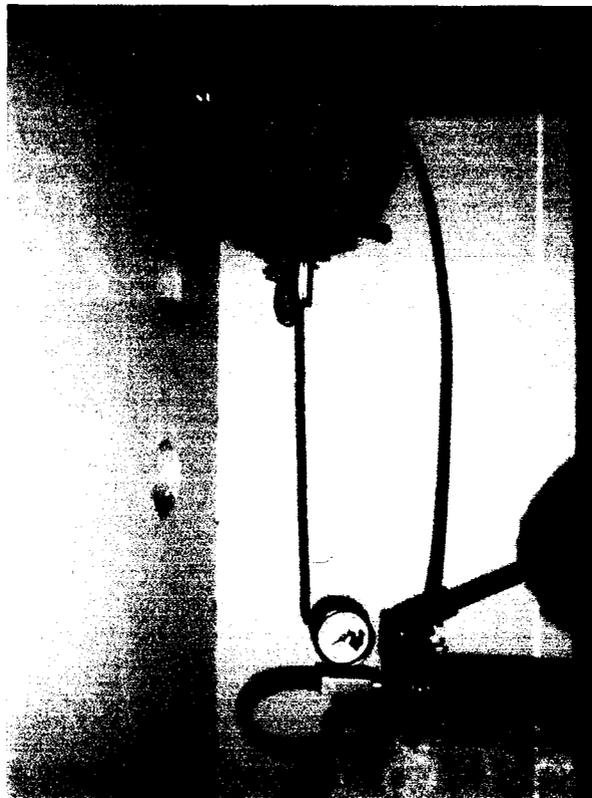


Figura 86. Sistema de aplicación de carga.

Para una mayor precisión de la prueba, se instrumentó el gato con un transductor de presión para poder leer la carga de forma digital. Se empleó un sistema de adquisición de datos Vishay P-3000 para leer los valores de carga (tras aplicar un factor para convertir la presión a un valor de fuerza). En la figura 87 se aprecia el montaje final del gato.

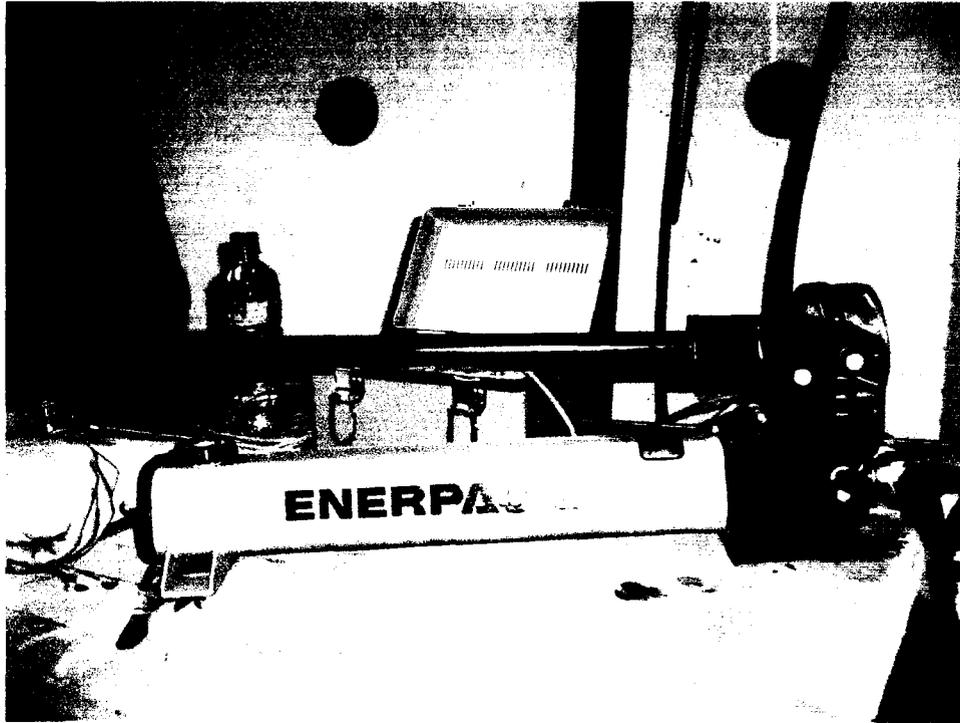


Figura 87. Gato instrumentado para leer los valores de carga aplicada.

La prueba se realizó bajo carga-descarga. Se aplicaron incrementos de carga de media tonelada hasta alcanzar valores enteros, entonces se descargaba el gato, registrando valores intermedios de la descarga. Se repitió la prueba hasta que el domo fallase. Los valores se iban registrando y se podían consultar durante la prueba, como se aprecia en la figura 88.



Figura 88. Lectura y registro de datos durante la prueba.

3.4 Estudio de costo - beneficio para los diferentes tipos de refuerzo empleados en vivienda a base de adobe.

En el Tecnológico de Monterrey se ha desarrollado un estudio para evaluar los diferentes tipos de refuerzo empleados en vivienda de adobe. La finalidad del estudio es evaluar el costo-beneficio de los diferentes tipos de refuerzo empleados en las viviendas de adobe, sobre todo en zona rural. Con la finalidad de estudiar la respuesta a carga dinámica de los diferentes tipos de refuerzo, se realizó un estudio experimental de viviendas de adobe a escala construidas en los laboratorios del ITESM. En la figura 89 se aprecia la mesa vibratoria del laboratorio de estructuras del ITESM.

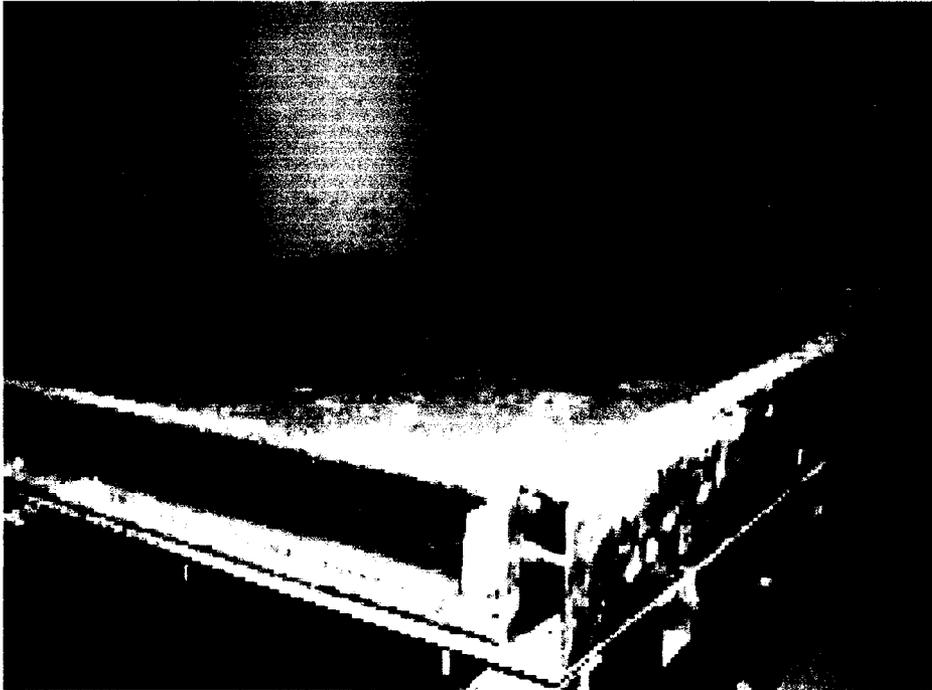


Figura 89. Mesa vibratoria del laboratorio de estructuras del ITESM.

La investigación y evaluación analítica de los diferentes tipos de refuerzo se realizó previamente en las oficinas del Centro de Diseño y Construcción. Para la evaluación experimental, se construyeron viviendas de adobe a escala sobre la mesa vibratoria del laboratorio de estructuras del ITESM. Para la construcción de las viviendas era necesaria la fabricación de tabiques de adobe a escala y la evaluación de su resistencia. Para conocer la resistencia de los tabiques a escala, se realizó una prueba a compresión y se instrumentaron los bloques con relojes comparadores, de acuerdo a las normas vigentes. En la figura 90 se puede apreciar la prueba a compresión y la instrumentación empleada.



Figura 90. Prueba a compresión de los tabiques de adobe a escala.

3.4.1 Instrumentación del proyecto.

Una vez conocida la resistencia de los tabiques de adobe a escala y estudiados los refuerzos más adecuados para las casas de adobe, se procedió a construir la primer vivienda sobre la mesa vibratoria. En la figura 91 se aprecia la vivienda construida.

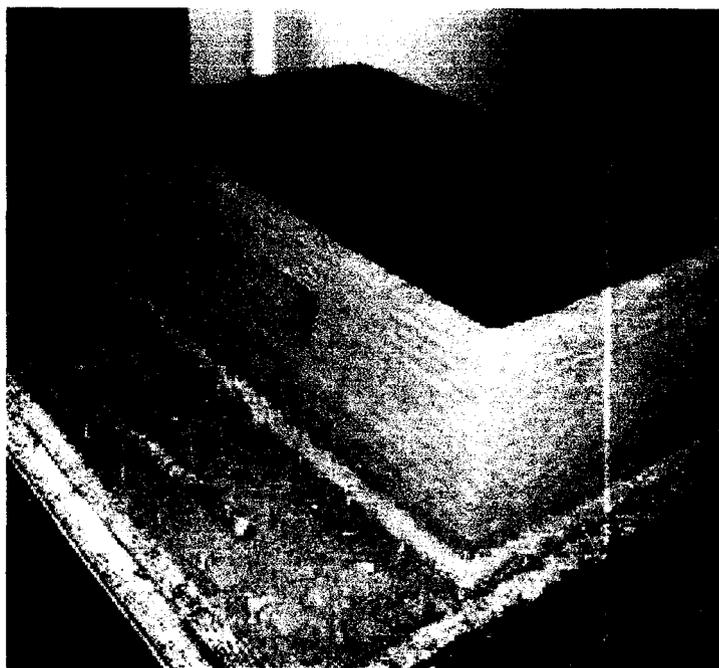


Figura 91. Vivienda de adobe construida sobre la mesa vibratoria.

Tras un análisis de la respuesta de la estructura, se eligieron los puntos de interés de la vivienda donde se requería conocer los valores de desplazamiento. Dada la necesidad de medir desplazamientos laterales, se decidió instrumentar el proyecto con tres LVDT's modelo Omega LD 3100-100.

Se eligió un punto de la mesa vibratoria para registrar el desplazamiento y aceleración en la base de la vivienda. Otros dos LVDT's se colocaron en dos puntos significativos en la parte superior de la vivienda. Los tres LVDT's se colocaron paralelos al eje de desplazamiento requerido y sujetos a cubos de madera instalados en la mesa y en la vivienda. En las figuras 92 a 94 se muestra el montaje de los LVDT's.

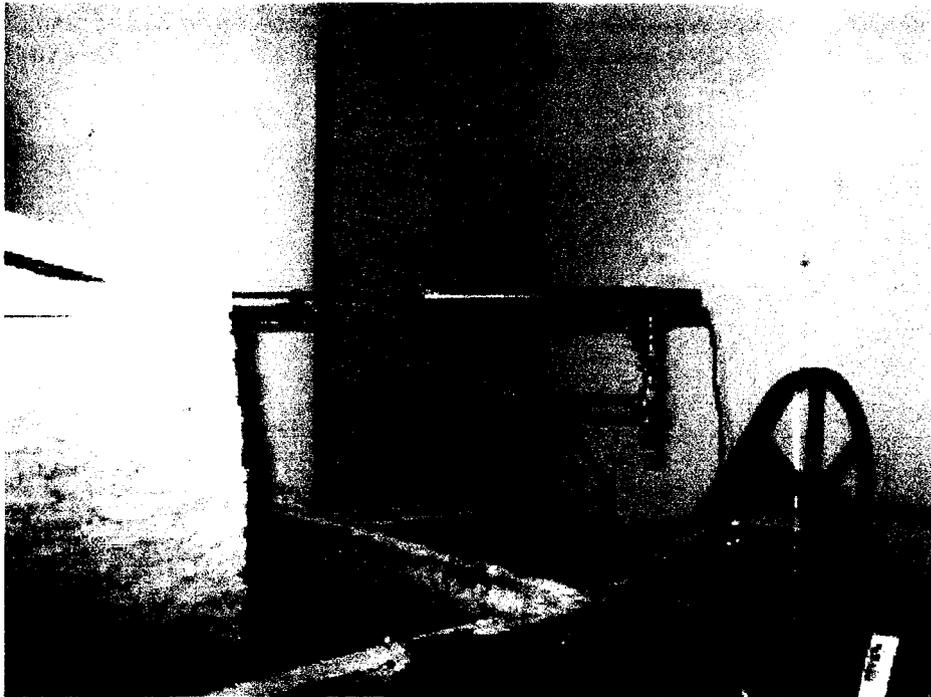


Figura 92. Montaje de uno de los LVDT's en la vivienda de adobe.

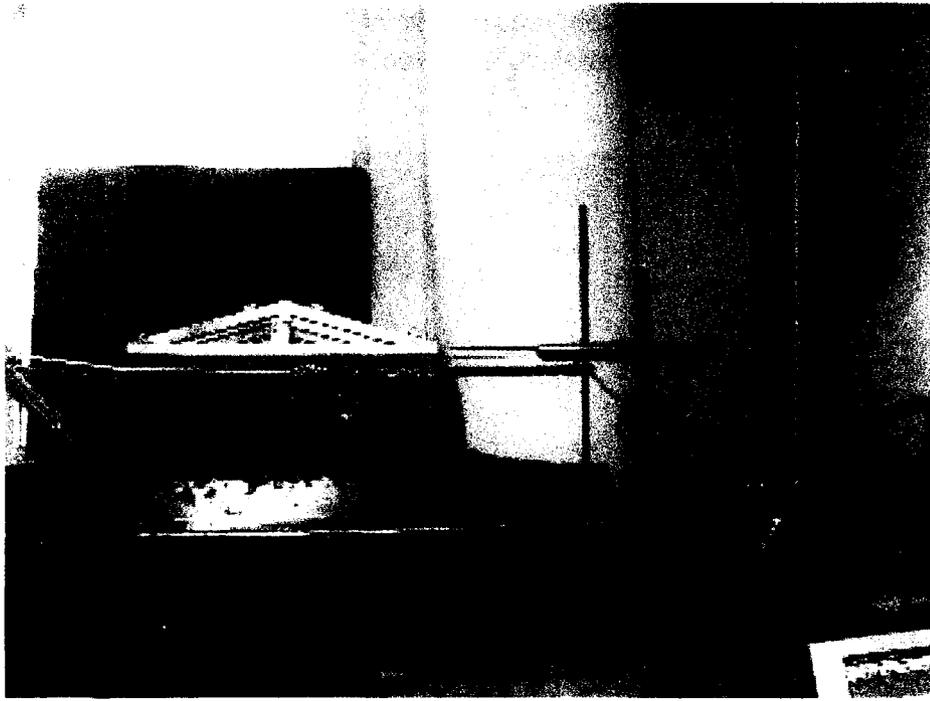


Figura 93. Vista de los dos LVDT's montados en la parte superior de la vivienda.

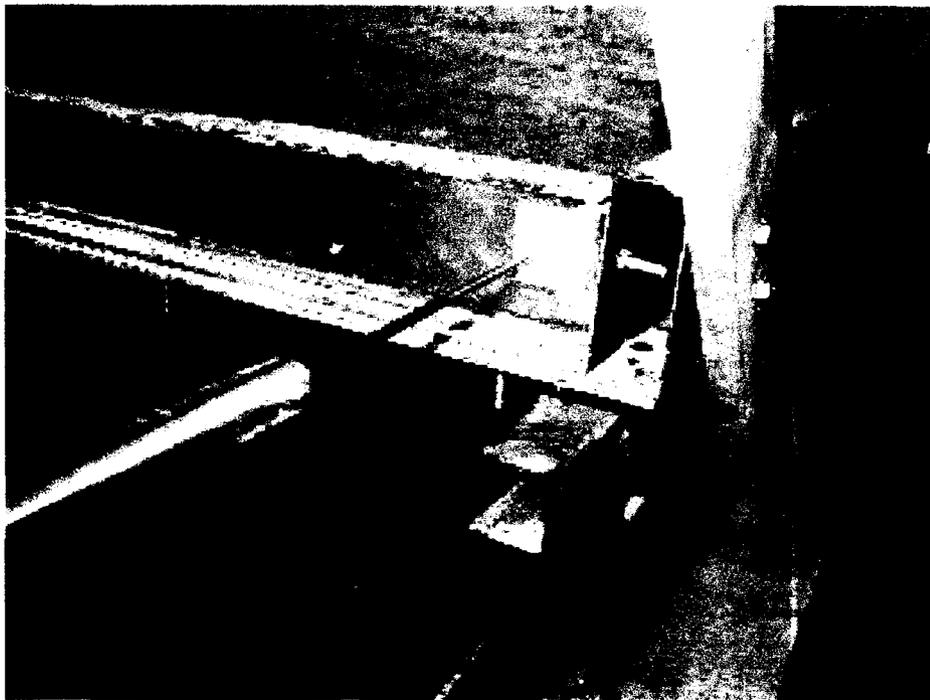


Figura 94. Montaje de LVDT en la mesa vibratoria.

El equipo utilizado para la recolección de información de los transductores de desplazamiento fue un sistema de adquisición de datos de sesenta y cuatro canales modelo NI PXI-1011 (ver figura 95).

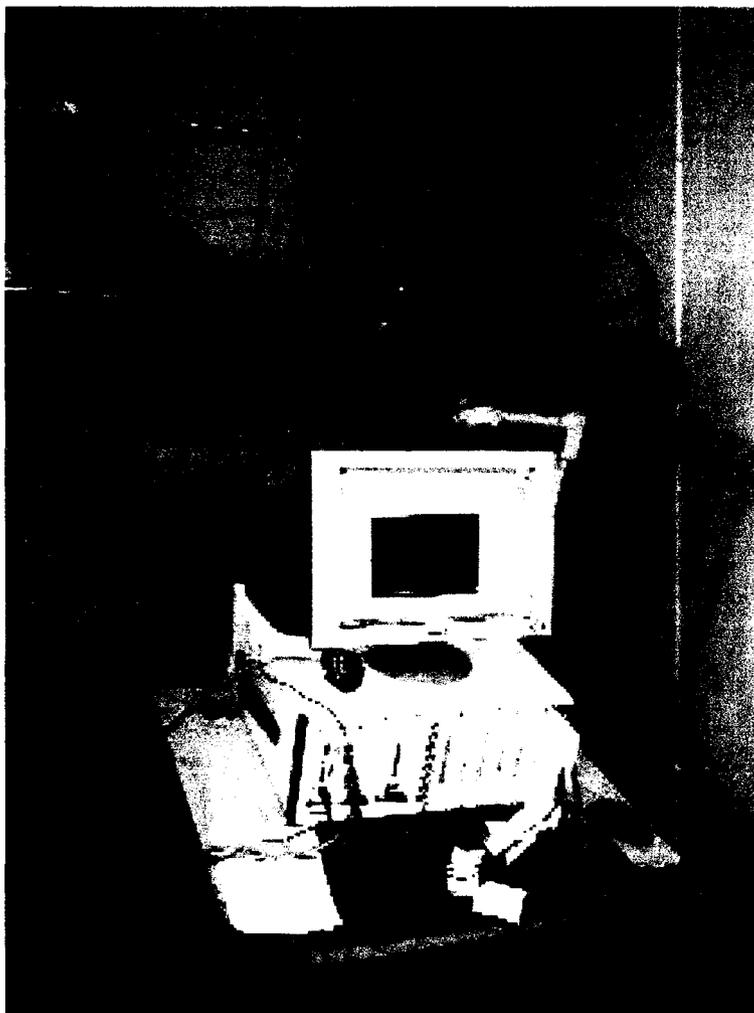


Figura 95. Sistema de adquisición de datos NI PXI-1011.

Se realizó un programa en LabVIEW para proporcionar el voltaje de entrada adecuado a los transductores de desplazamiento, leer y almacenar la información durante la prueba.

Las pruebas realizadas a la vivienda de adobe consistieron en una parte estática y otra dinámica. La prueba estática se llevó a cabo mediante la aplicación de carga lateral sostenida a la vivienda, con incrementos de carga de 5 kg. (ver figura 96). La parte dinámica consistió en la prueba con la mesa vibratoria a diferentes velocidades de la misma (ver figura 97). Los datos de ambas partes se registraron en el centro de adquisición de datos para su posterior análisis.

Tras la prueba, la vivienda fue reforzada para repetir las mismas pruebas y evaluar el desempeño del refuerzo. La misma secuencia se siguió para los otros tipos de refuerzo.

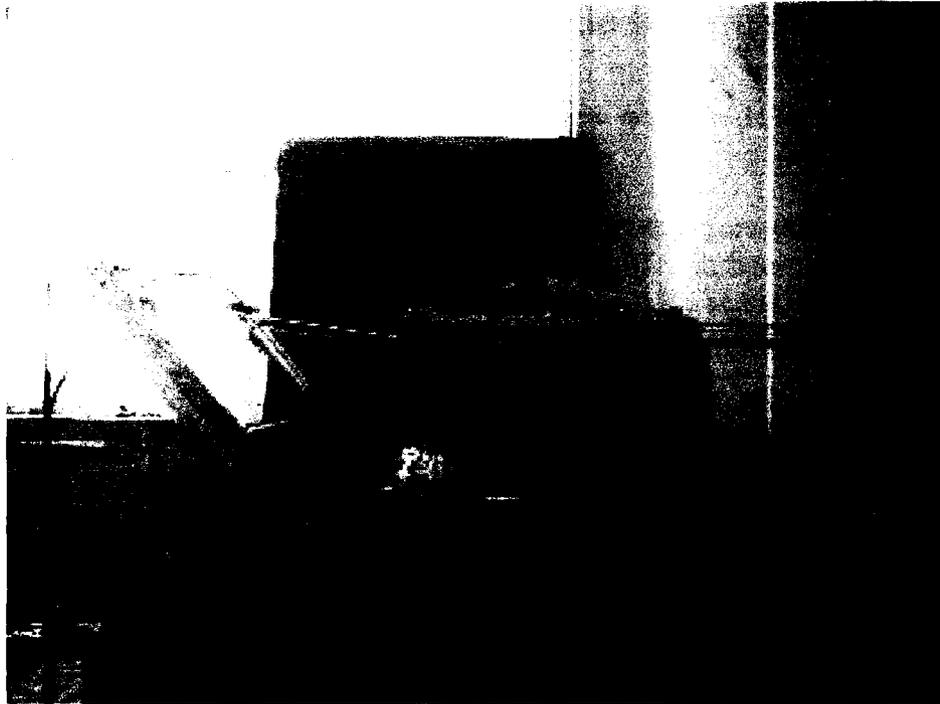


Figura 96. Montaje de la prueba estática.

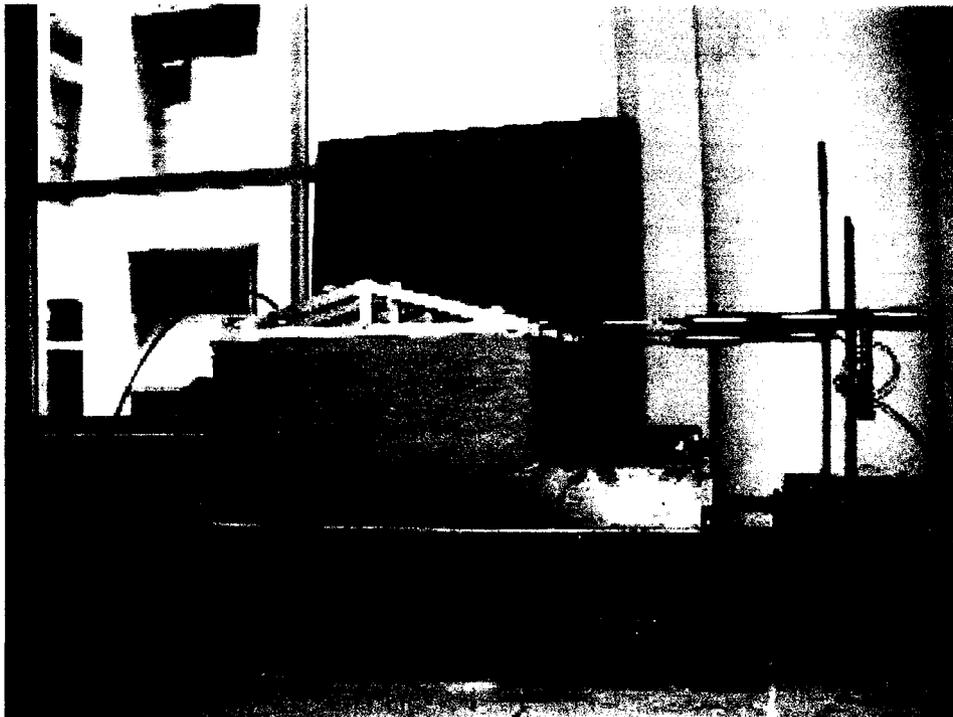


Figura 97. Montaje de la prueba dinámica.

CAPÍTULO 4 Resultados de las pruebas

4.1 Evaluación analítica y experimental de un domo a escala 1:0.6 construido en mesa vibratoria en los laboratorios de Texas A&M.

Los desplazamientos registrados en la base de la estructura durante la aplicación de funciones senoidales son los que se muestran de la figura 98 a la figura 102. En la figura 102 (frecuencia de 3.0 Hz) se observa que después de 30 segundos se dispara el desplazamiento, esto a consecuencia de que la mesa vibratoria sufrió un desperfecto que posteriormente fue reparado.

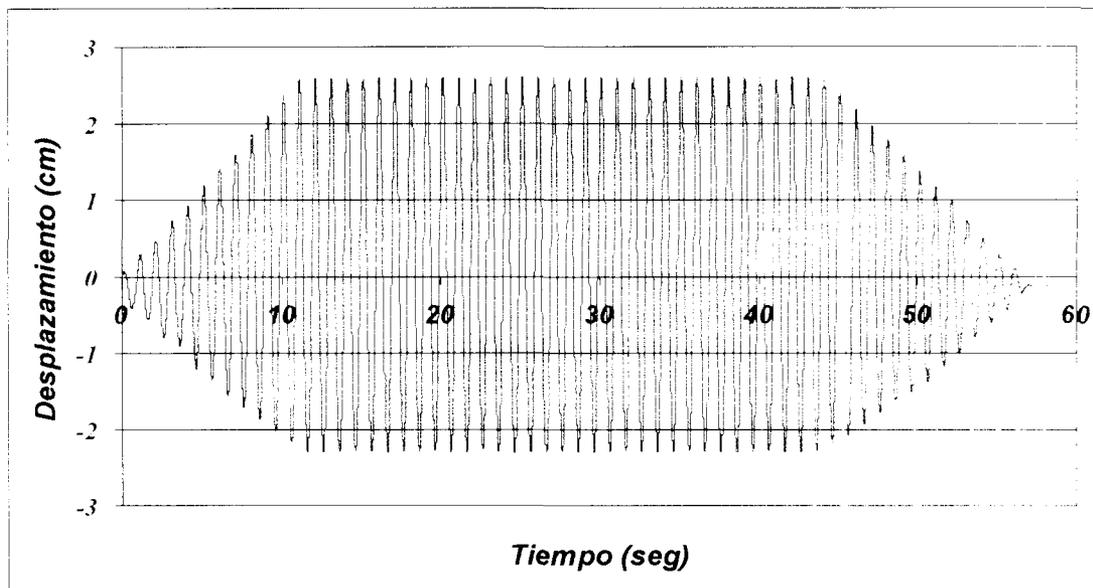


Figura 98. Desplazamiento senoidal registrado en la base, con frecuencia de 1.0 Hz

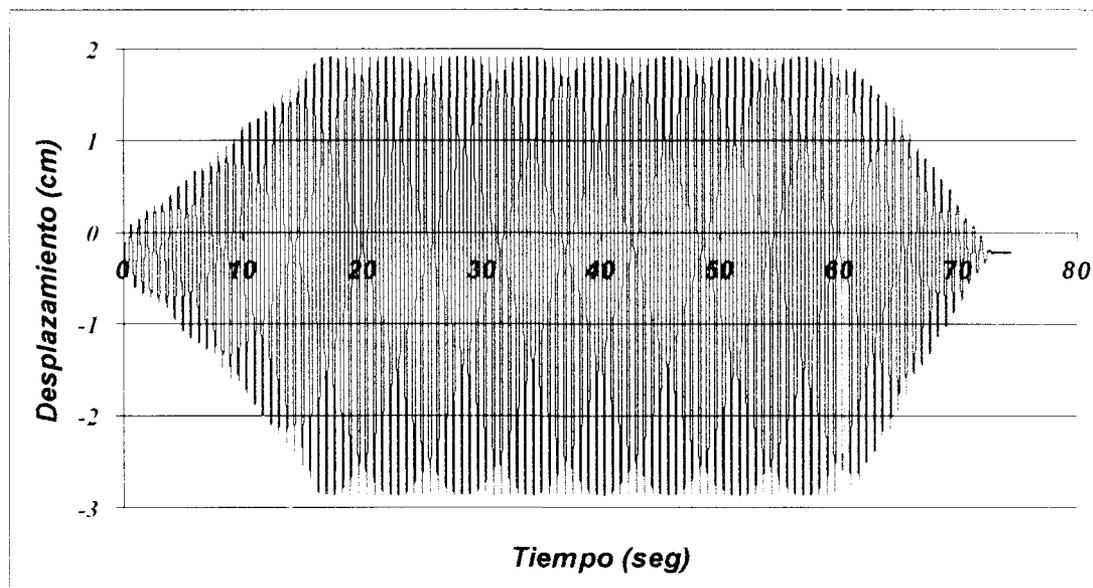


Figura 99. Desplazamiento senoidal registrado en la base, con frecuencia de 1.5 Hz

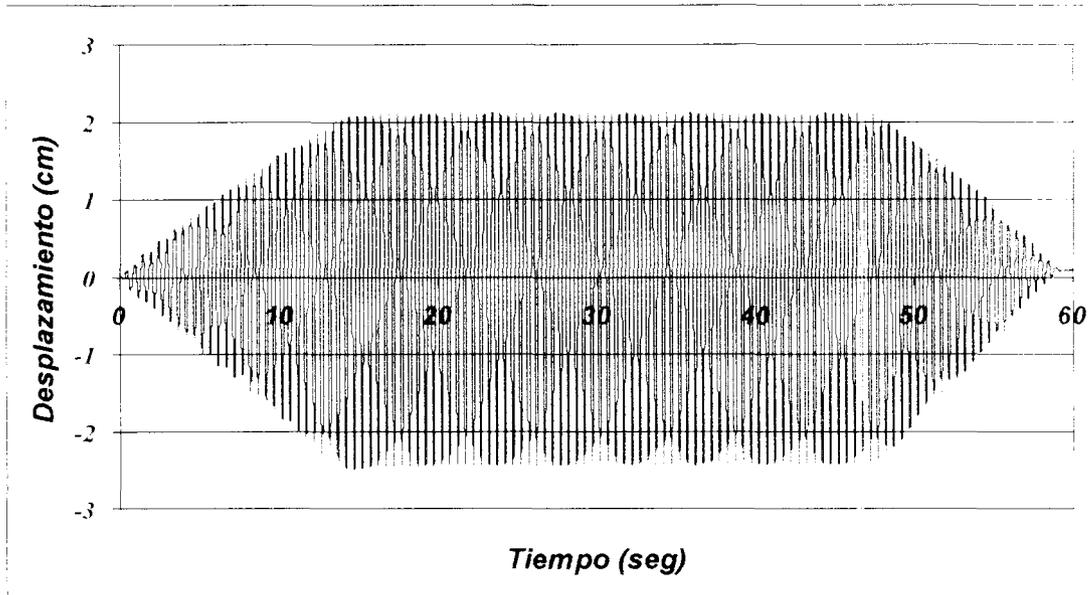


Figura 100. Desplazamiento senoidal registrado en la base, con frecuencia de 2.0 Hz

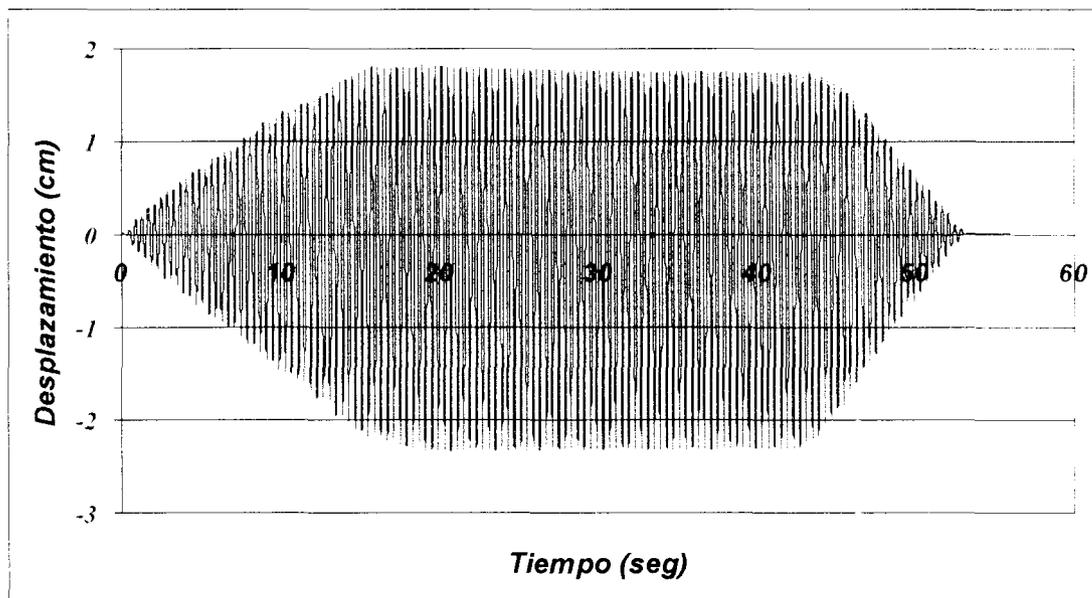


Figura 101. Desplazamiento senoidal registrado en la base, con frecuencia de 2.5 Hz

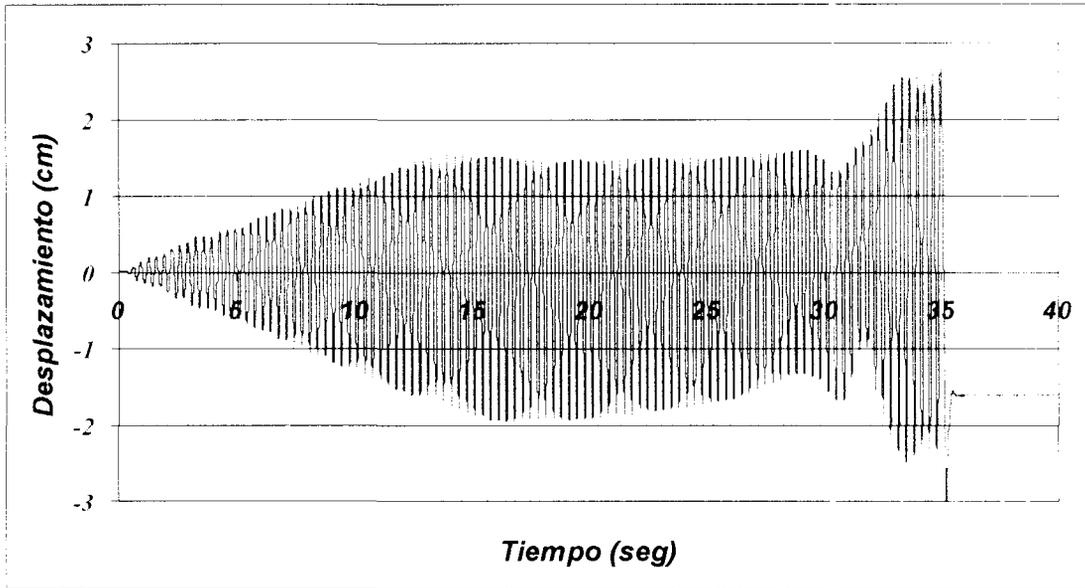


Figura 102. Desplazamiento senoidal registrado en la base, con frecuencia de 3.0 Hz

En las figuras 103 a 107 se muestran los desplazamientos registrados en el LVDT superior, en la cresta del Tecnodomo.

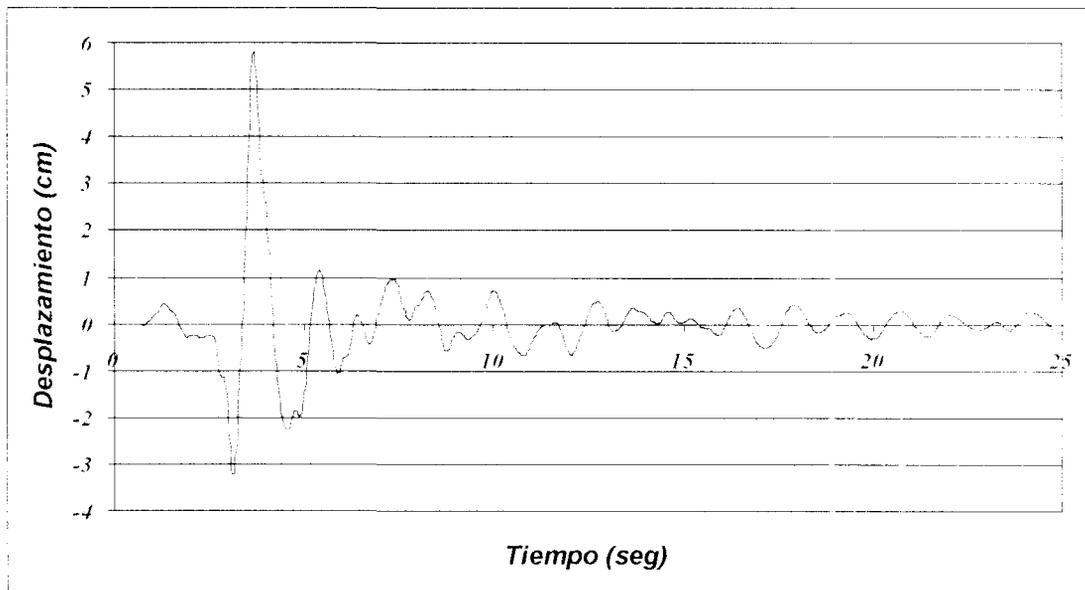


Figura 103. Desplazamiento registrado en el LVDT superior, bajo el sismo de Colima (2003)

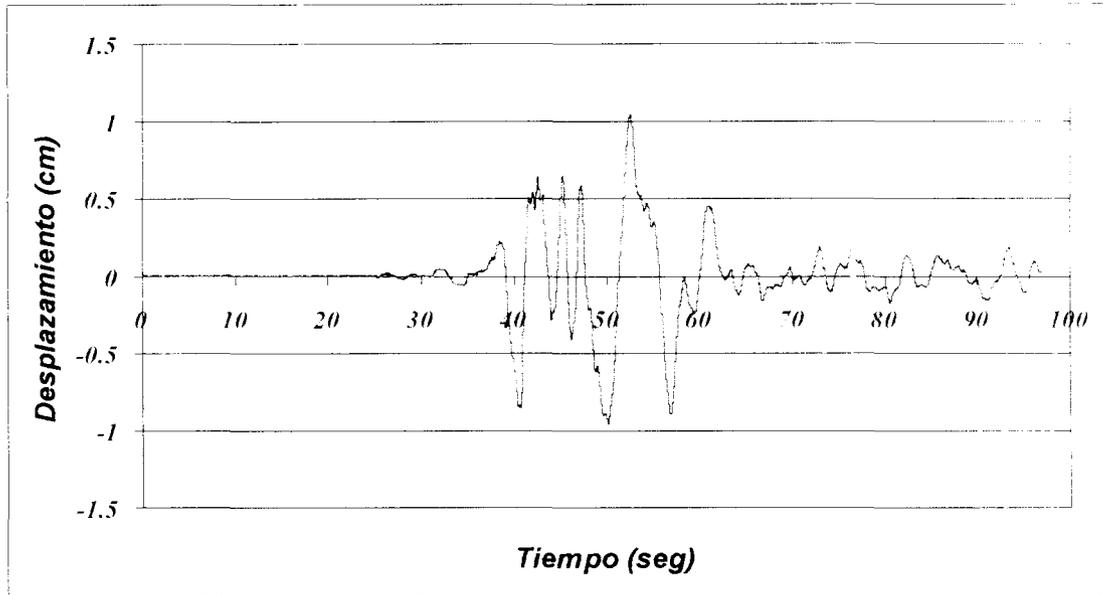


Figura 104. Desplazamiento registrado en el LVDT superior, bajo el sismo de México (1985)

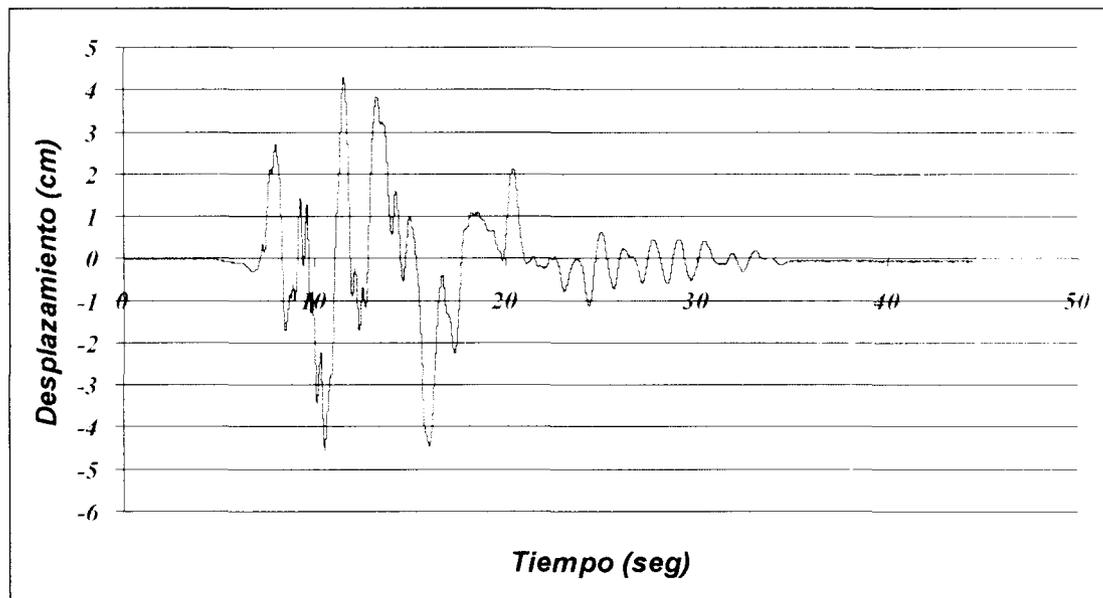


Figura 105. Desplazamiento registrado en el LVDT superior, bajo el sismo de Kobe (1995)

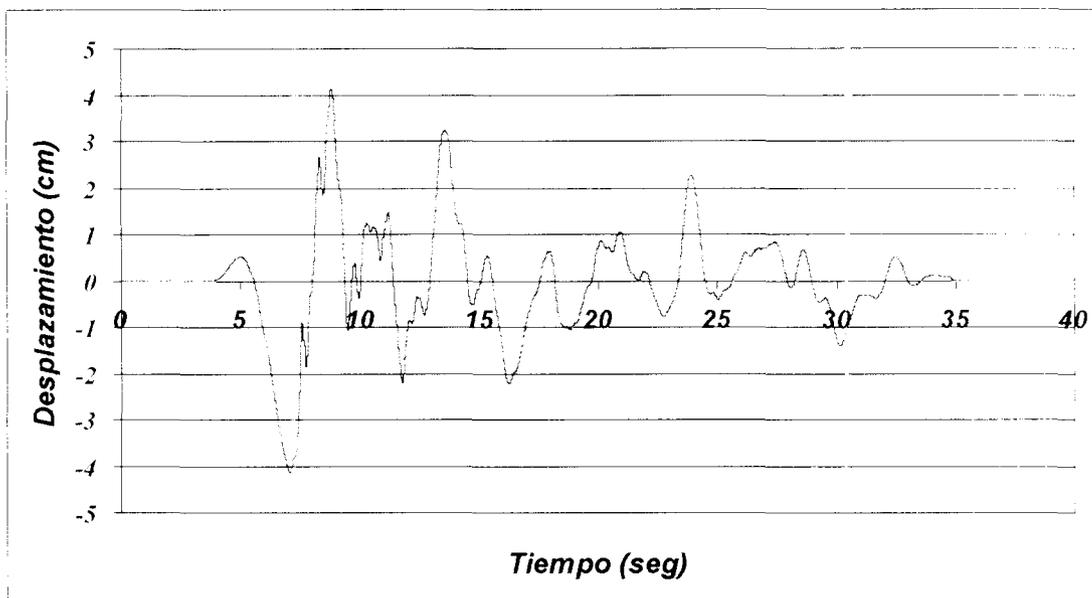


Figura 106. Desplazamiento registrado en el LVDT superior, bajo el sismo de Lomapieta (1989)

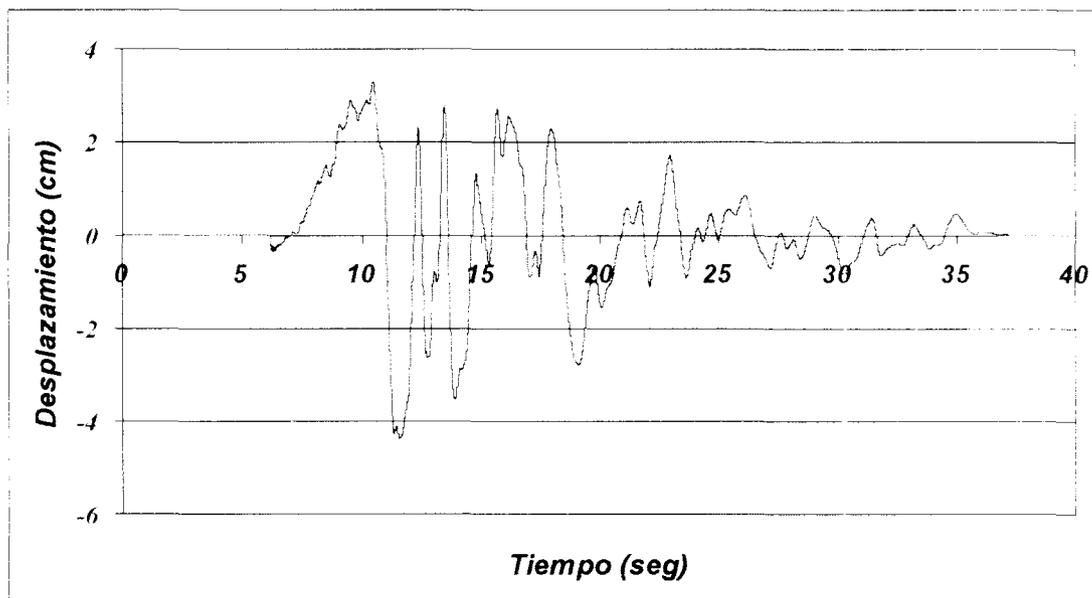


Figura 107. Desplazamiento registrado en el LVDT superior, bajo el sismo de Northridge (1994)

Los esfuerzos que se registraron en los puntos instrumentados con galgas extensométricas se presentan en la tabla 3.

Función	Esfuerzo	Ubicación de galga extensométrica			
		A	B	C	F
Senoidal - 1 Hz	maximo	2.04	6.12	22.44	2.04
	minimo	0.00	0.00	0.00	0.00
Senoidal 1.5 Hz	maximo	8.16	20.40	22.44	2.04
	minimo	-4.08	-24.48	-22.44	0.00
Senoidal - 2 Hz	máximo	10.20	34.68	10.20	6.12
	minimo	0.00	0.00	-28.56	0.00
Senoidal 2.5 Hz	maximo	18.36	20.40	44.88	16.32
	minimo	-16.32	-42.84	-24.48	0.00
Senoidal 3 Hz	maximo	40.80	169.32	108.12	53.04
	minimo	0.00	-4.08	0.00	0.00
Colma (2003)	máximo	2.04	4.08	6.12	2.04
	minimo	-2.04	-4.08	-6.12	0.00
Mexico (1985)	maximo	2.04	4.08	6.12	2.04
	minimo	-2.04	-4.08	8.16	0.00
Kobe (1995)	maximo	4.08	12.24	30.60	4.08
	minimo	-10.20	-26.52	-36.54	0.00
Loma Prieta (1989)	maximo	4.08	14.28	48.96	8.16
	minimo	-6.12	-20.40	-28.56	-8.16
Northridge (1994)	maximo	4.08	14.28	36.72	22.44
	minimo	-4.08	-14.28	42.48	-10.20

Tabla 3. Esfuerzos registrados en las galgas extensométricas (Yeomans et al, 2005b)

Las lecturas realizadas durante la prueba permitieron presentar una comparación de la respuesta del domo en términos de esfuerzo, desplazamiento y del comportamiento general del tecnodomo (Yeomans et al, 2005). Para el modelo del tecnodomo ensayado, los resultados experimentales fueron consistentes con los valores esperados con base en la teoría de la ingeniería estructural. Finalmente, en este proyecto se concluyó que el comportamiento del Tecnodomo bajo cargas sísmicas es adecuado.

4.2 Evaluación analítica y experimental de un domo a escala construido en los laboratorios del ITESM, sujeto a carga gravitacional.

Los desplazamientos registrados en los lados del domo fueron nulos. El domo no presentó desplazamiento horizontal bajo ninguna de las cargas aplicadas. De hecho, el domo no falló bajo la carga máxima aplicada (30 toneladas). En el LVDT vertical se obtuvieron las lecturas que se presentan en la figura 108 para el primer valor registrado por incremento y el último ciclo de carga.

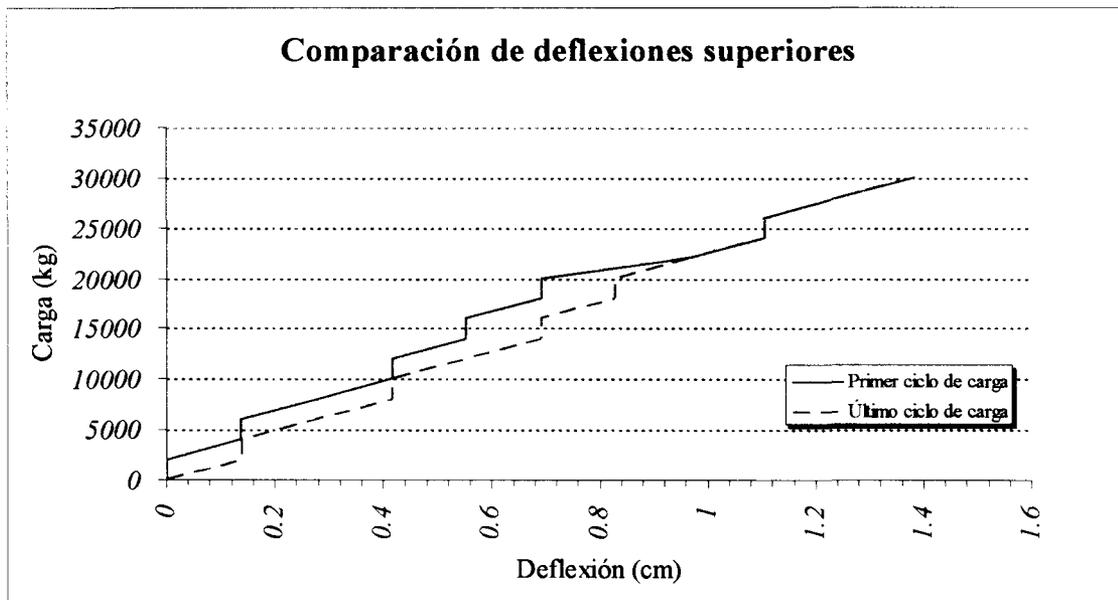


Figura 108. Deflexiones registradas en el primer ciclo de carga y último.

El esfuerzo máximo registrado por la galga extensométrica crítica se presenta en la figura 109 de forma gráfica a lo largo de toda la prueba. En ningún momento se alcanzó un valor de esfuerzo crítico.

Las lecturas realizadas durante la prueba permitieron conocer la respuesta del domo en términos de esfuerzo, desplazamiento y del comportamiento general del tecnodomo. Para el modelo del tecnodomo ensayado, los resultados experimentales fueron consistentes con los valores esperados del análisis estructural. Finalmente, en este proyecto se concluyó que el comportamiento del Tecnodomo bajo cargas gravitacionales es bueno.

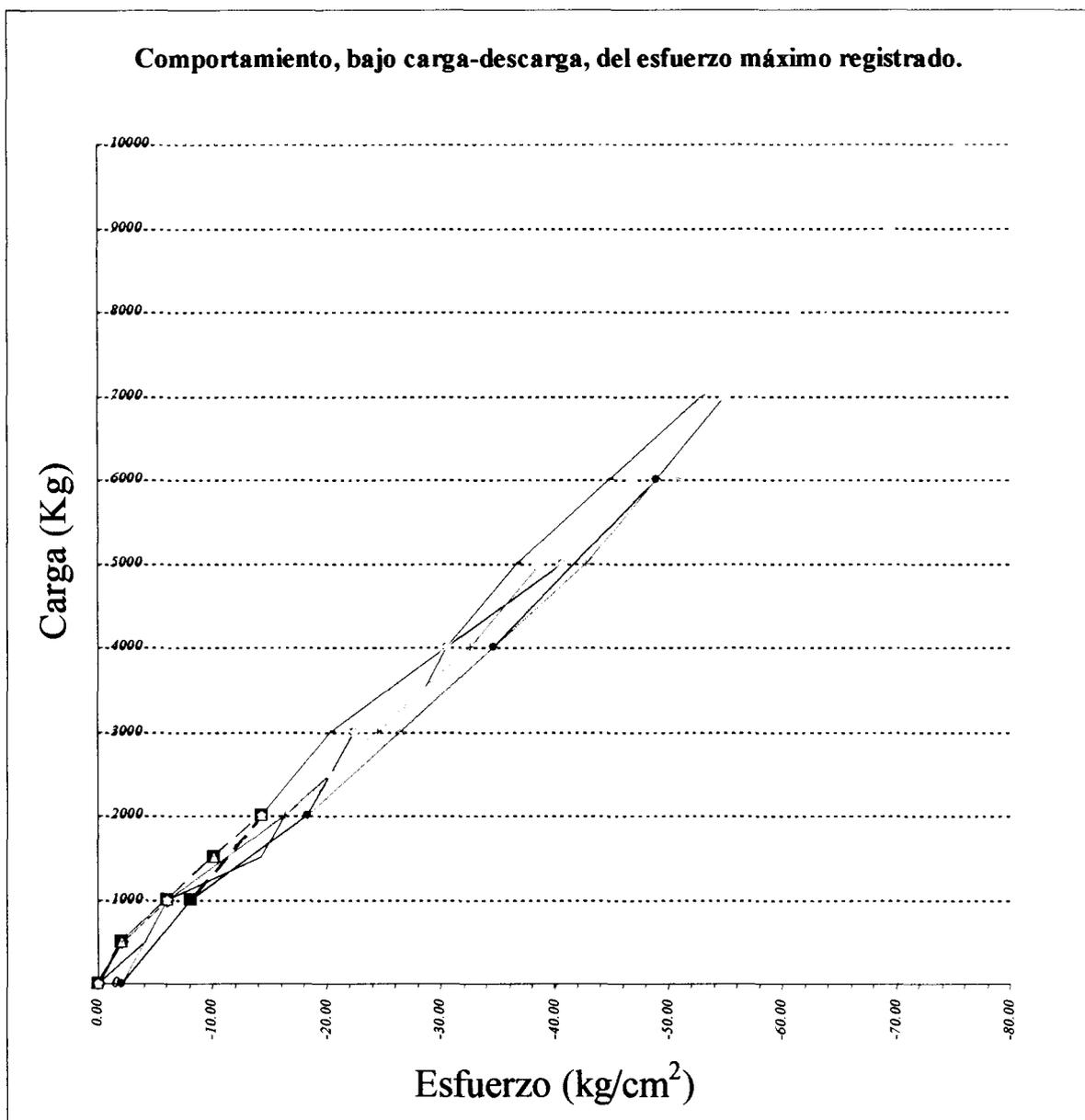


Figura 109. Esfuerzo registrado durante toda la prueba en el punto crítico.

4.3 Estudio de costo - beneficio para los diferentes tipos de refuerzo empleados en vivienda a base de adobe.

Los resultados se presentaron a los responsables del proyecto para su análisis. El comportamiento de los instrumentos fue adecuado y no se presentaron problemas para las lecturas.

Las graficas obtenidas presentaron el comportamiento típico que se mostró en los resultados de los dos proyectos anteriores.

CAPÍTULO 5 Conclusiones y Recomendaciones

5.1 Conclusiones

Tras el desarrollo de este trabajo se concluye que la instrumentación y captura de datos en apoyo a los proyectos de *Evaluación analítica y experimental de un domo a escala 1:0.6 construido en mesa vibratoria en los laboratorios de Texas A&M* y *Evaluación analítica y experimental de un domo a escala construido en los laboratorios del ITESM, sujeto a carga gravitacional* fue adecuada. Se aplicaron los conocimientos documentados en el capítulo dos para seleccionar y aplicar el equipo más adecuado conforme a las necesidades de cada proyecto. En los resultados se apreció que las lecturas no presentaron problemas y por lo tanto se tuvieron datos confiables.

Es indispensable contar con un experto en instrumentación. En otros proyectos donde se apoyó en la parte de instrumentación, fue importante contar con una sola persona que se encargará de la parte experimental. Un experto en instrumentación permite a los otros proyectos de investigación dedicarle un mayor tiempo a su análisis de resultados y olvidarse de la planeación del equipo, de su montaje y adquisición de datos. Al contar con un experto en instrumentación, se puede continuar el proceso de documentación iniciado con este trabajo.

Es fundamental el trabajo en equipo. En el proyecto de *Estudio de costo - beneficio para los diferentes tipos de refuerzo empleados en vivienda a base de adobe* se presentaron dificultades ocasionadas por la falta de comunicación entre la parte responsable del proyecto y la parte responsable de la instrumentación. Finalmente, tras una mejora en los procesos de comunicación y un mejor trabajo en conjunto, se obtuvieron las lecturas de la prueba experimental. Los resultados de esta prueba no se ha documentado pues emplea la misma instrumentación que el proyecto de *Evaluación analítica y experimental de un domo a escala 1:0.6 construido en mesa vibratoria en los laboratorios de Texas A&M* y las graficas resultantes son del mismo tipo.

En ciertos proyectos se tiende a descuidar la parte de instrumentación. Este trabajo logra resaltar la importancia de la instrumentación dentro de cualquier proyecto con componente experimental. Se ha demostrado que el estudio, selección, implantación y aplicación de equipo de laboratorio en proyectos con componente experimental es una labor compleja y que requiere tiempo para ser planeada y ejecutada.

Para preservar el conocimiento adquirido se desarrollaron fichas técnicas de los equipos implementados y un manual para crear instrumentos virtuales con Labview. Estas partes adicionales, pero importantes, permiten complementar lo estudiado en el capítulo dos y profundizar lo aprendido en el capítulo tres. Una conclusión importante de este trabajo es que la implementación de software gráfico e instrumentos más novedosos es una mejora sustancial al proceso de instrumentación y adquisición de datos. Conocer programas como

LabVIEW y el concepto de instrumento virtual permiten ampliar las opciones existentes para instrumentar pruebas.

Finalmente, del desarrollo de este trabajo se concluye que la instrumentación de un proyecto con componente experimental requiere de un buen conocimiento de los instrumentos, planeación correcta de la prueba experimental, creatividad y una buena comunicación con las demás partes responsables del proyecto. Los resultados de cada proyecto con componente experimental dependen directamente de una buena instrumentación, por lo que el desarrollo de este trabajo permite que futuros proyectos que se desarrollen en los laboratorios del ITESM cuenten con una herramienta que les proporcione información y experiencia útiles. La instrumentación es una parte técnica muy importante en los proyectos y por lo tanto requiere de estudio y práctica para obtener resultados sin errores.

5.2 Recomendaciones

Se recomienda continuar desarrollando un área experta en instrumentación, con la finalidad de implementar procesos más sencillos en el desarrollo de pruebas experimentales, el empleo de códigos de instrumentación comunes a todos los proyectos e investigación más detallada de los instrumentos óptimos.

Es importante continuar investigando con los diferentes proveedores de equipo sobre nuevos transductores que faciliten los montajes de las pruebas experimentales. De igual modo se recomienda adquirir equipo general, no tan especializado, para obtener mayor beneficio al poderlo aplicar en diversos proyectos y no en uno solo.

Es posible desarrollar instrumentos virtuales mejorados. Se recomienda revisar e implementar mejoras en los instrumentos virtuales existentes y continuar la investigación de las funciones del software LabVIEW en sus versiones más recientes.

Se recomienda continuar documentando pruebas experimentales y desarrollar un segundo documento que complemente la información desarrollada en este trabajo.

CAPÍTULO 6 Bibliografía

- **Bazan, E.; Meli, R.** (1999), *“Diseño sísmico de edificios”*. Editorial Limusa. México.
- **Garcimartín, Angel,** (2004), *Sistemas de medida y adquisición de datos*, (1a ed), Pamplona, Navarra. España: Universidad de Navarra.
- **Google,** (2004), *Búsqueda de información*, Google, [En red]. Disponible en: <http://www.google.com.mx>, México.
- **IMCYC,** (2005), *Revista Construcción y tecnología*, número 202, Editorial IMCYC, México D.F.
- **Harris, Harry; Sabnis, Gajanan,** (1999), *Structural Modeling and experimental techniques*, (2a. ed), Florida, E.U.A.: CRC Press LLC.
- **Kooltrak,** (2005), *Información de equipo*, Kooltrak, [En red]. Disponible en: <http://www.kooltrak.com>, Estados Unidos de América.
- **Meli, Roberto,** (2001), *Diseño Estructural*, (2a ed), México, DF. México: Limusa.
- **MTS System Corporation,** (2005), *Información de equipo*, MTS [En red]. Disponible en <http://www.mts.com>, Estados Unidos de América.
- **National Instruments,** (2005), *Información de equipo*, NI, [En red]. Disponible en: <http://www.ni.com>, Estados Unidos de América.
- **National Instruments,** (2002), *“SCXI, User Manual”*. Estados Unidos.
- **Nungaray, Carlos; Yeomans, Francisco; Roschke, Paul; Dávalos, César.; Shook, David.** (2005), *“Evaluación Analítica y Experimental de un Tecnodomo Sujeto a Cargas Sísmicas”*. ITESM-TAMU. México-Estados Unidos de América.
- **Omega Engineering Inc,** (2005a), *“Series Linear Variable Displacement Transducers, Operator’s Manual”*. Estados Unidos.
- **Omega Engineering Inc,** (2005b), *Información de equipo*, Omega, [En red]. Disponible en: <http://www.omega.com>, Estados Unidos de América.
- **Solartron Metrology,** (2004), *Solartron, Catalogo LVDTs*, Solartron, [En red]. Disponible en: <http://www.solartronmetrology.com/downloads/catalogue>, Estados Unidos de América.
- **Vishay,** (2005), *Información de equipo*, Micro Measurements, [En red]. Disponible en: <http://www.vishay.com>, Estados Unidos de América.

- **Yeomans, Francisco; Almada, Delma; Reynoso, Ricardo,** (1998), Manual del Laboratorio de Estructuras, (1a ed), Monterrey, NL. México: I.T.E.S.M.
- **Yeomans, F.; Reynoso, R.; Marín, J.; Muñoz, F.** (2004), *“Manual del Sistema Constructivo Tecnodomo”*. ITESM. México.
- **Yeomans, Francisco; Roschke, Paul; Nungaray, Carlos.; Dávalos, César.; Shook, David.** (2005), *“Dynamic Failure of a Thermally Efficient Structural Dome”*. ITESM-TAMU. México-Estados Unidos de América.
- **Yeomans, Francisco; Roschke, Paul; Nungaray, Carlos.; Dávalos, César.; Shook, David.** (2005), *“Dynamic Failure of a Thermally Efficient Structural Dome, final report”*. ITESM-TAMU. México-Estados Unidos de América.
- **Wilson, James,** (1993), Experimental Solid Mechanics, (1a ed), E.U.A.: McGraw-Hill.

CAPÍTULO 7 Anexos

ANEXO 1.- Tabla de tipos de galgas. Descripción, aplicación y características

Serie de la galga	Descripción y aplicaciones principales	Rango de temperatura	Rango de deformación	Vida por fatiga	
				$\mu\epsilon$	Número de ciclos
EA	Rejilla de constantán con respaldo de poliimida con amplio rango de opciones disponibles, para pruebas de esfuerzos bajo condiciones estáticas y dinámicas. No recomendada para transductores o ensayos de alta precisión.	Normal: -75 °C Casos especiales: corta duración -195°C a + 205°C	± 3% de longitud menor de 3.2 mm ± 5% de longitud mayor de 3.2 mm	± 1800 ± 1500 ± 1200	10E ⁵ 10E ⁶ 10E ⁸
CEA	Como el anterior, rejilla de constantán para uso universal completamente encapsulada en poliimida con grandes terminales de cobre para soldar cables directamente. Se emplea principalmente para pruebas estáticas y dinámicas.	Normal: -75°C a 175°C Rosetas (sobrepuestas): +65°C	± 3% de longitud menor de 3.2 mm ± 5% de longitud mayor de 3.2 mm	± 1800 ± 1500	10E ⁵ 10E ⁶ Aumenta la vida por fatiga utilizando soldadura suave.
N2A	Rejilla de constantán sin encapsular con respaldo delgado de poliimida. Especialmente recomendada para transductores de precisión, por su casi nula desviación en ensayos repetitivos y para pruebas en que se requieran grandes formatos por lo delgado de su matriz.	En transductores con cargas estáticas normales -75°C a +95°C	± 3 %	± 1700 ± 1500	10E ⁶ 10E ⁷
J2A	Rejilla de constantán con respaldo y encapsulado delgado de poliimida laminado y terminales expuestas para soldadura de cables; aunque más grueso que el N2A permite mayor refuerzo en transductores que trabajan en flexión.	En transductores con cargas estáticas normales -75°C a + 95°C	± 2 %	± 1700 ± 1500	10E ⁶ 10E ⁷
ED	Rejilla elástica combinada con una capa flexible y resistente de poliimida, su alto factor de galga y resistencia a la fatiga la hacen adecuada en pruebas dinámicas. No se recomienda en pruebas estáticas por su alta señal de salida térmica.	Ensayos dinámicos: - 195°C a +205°C	± 2% no lineal; para deformaciones mayores ± 5%	± 2500 ± 2200	10E ⁶ 10E ⁷
WA	Rejilla de constantán totalmente encapsulada con cables de gran resistencia, aplicable a altos rangos de temperatura y bajo severas condiciones ambientales, disponible con opción W aunque restringe su vida útil por fatiga.	Pruebas normales: -75°C a +205°C periodos cortos: -195°C a +206°C	± 2%	± 2000 ± 1800 ± 1500	10E ⁵ 10E ⁶ 10E ⁷
EK	Rejilla con respaldo resistente y flexible de poliimida, se recomienda cuando se requiera combinar resistencia, estabilidad a altas temperaturas y una gran flexibilidad d la galga.	Pruebas normales: -195°C a +175°C periodos cortos: -269°C a +205°C	± 1.5%	± 1800	10E ⁷
WK	Rejilla totalmente encapsulada con cables de gran resistencia; permite el más amplio rango de temperaturas y las condiciones ambientales más severas así como auto compensación por temperatura. Opción W disponible restringe vida por fatiga y rango de temperatura.	Pruebas normales: - 269°C a +290°C periodos cortos: -269°C a +400°C	± 1.5%	± 2400 ± 2200 ± 2000	10E ⁶ 10E ⁷ 10E ⁸
EP	Rejilla especial de constantán recocado con respaldo flexible y resistente de poliimida, usado principalmente en ensayos fuera del límite elástico o materiales de bajo módulo (polimeros). Disponibles las opciones E, L y LE pero pueden restringir su deformación	-75°C a 205°C	± 10% de longitud menor de 3.2 mm ± 20% de longitud mayor de 3.2 mm	± 1000	10E ⁴ EP no muestra desviación en pruebas ciclicas
SA	Rejilla de constantán totalmente encapsulado con puntos de soldadura, matriz igual a los WA y mismos usos también; aunque reduce algo sus rangos de temperatura y condiciones ambientales debido a los puntos de soldadura.	Pruebas normales: -75°C a + 205°C Periodos cortos: -195°C a + 230°C	± 2%	± 1800 ± 1500	10E ⁶ 10E ⁷
S2K	Rejilla laminada a 0.025 mm de espesor con respaldo de poliimida mejorado y totalmente encapsulado, incluyendo las terminales. Disponible con grandes terminales para facilitar cableado.	Pruebas normales: -75°C a +120°C Periodos cortos: -185°C a +150°C	± 1.5 %	± 1800 ± 1500	10E ⁶ 10E ⁷
SK	Rejilla totalmente encapsulada y con puntos de soldadura, iguales usos que los WK pero reduce rangos de temperatura y condiciones ambientales por puntos de soldadura.	Pruebas normales: -75°C a +120°C Periodos cortos: -185°C a + 150°C	± 1.5 %	± 2200 ± 2200	10E ⁶ 10E ⁷
WD	Rejilla elástica totalmente encapsulada con cables de alta resistencia, utilizado para pruebas dinámicas en condiciones ambientales severas.	Pruebas dinámicas: -195°C a + 260°C	± 1.5 % no lineal, para deformación arriba ± 5%	± 3000 ± 2500 ± 2200	10E ⁵ 10E ⁷ 10E ⁸
SD	Equivalente al WD pero con puntos de soldadura en lugar de cableado.	Pruebas dinámicas: -195°C a +205°C	± 1.5 % ver nota anterior	± 2500 ± 2200	10E ⁶ 10E ⁷

ANEXO 2.- Lista de material y equipo que se requiere para cementar una galga**Equipo (comprar de preferencia 2 meses antes de la instalación)**

- Unidad de soldadura (con temperatura controlada y puntas finas tipo pala para uso electrónico.
- Multímetro con un rango mínimo de 0 a 500V, resolución de 0.01V y precisión de 0.05%

Material (comprar de preferencia 2 meses antes de la instalación)

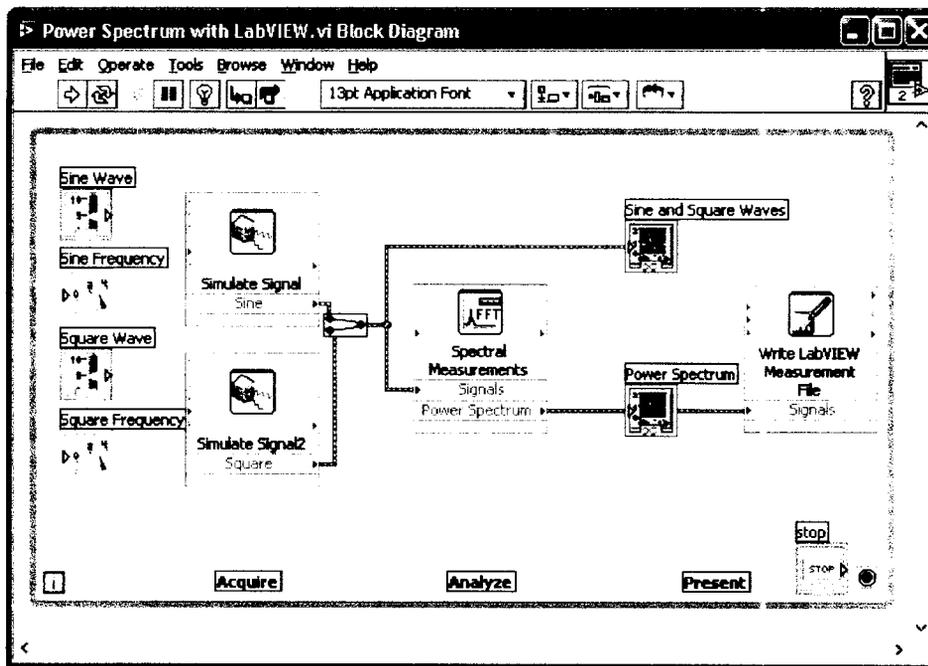
- Galgas seleccionadas de acuerdo al proyecto
- Pegamento adecuado al tipo de galga a cementar.
- Catalizador
- Acondicionador
- Neutralizador
- Cable calibre 18 (rojo)
- Cable calibre 18 (negro)
- Cable calibre 18 (blanco)

Material (comprar un mes antes de la instalación)

- Soldadura con corazón de pasta $\phi = 0.1$ mm uso electrónico
- Pasta para soldadura
- Limas
- Lija para metal ("de agua") # 260
- Lija para metal ("de agua") # 320
- Lija para metal ("de agua") # 400
- Aplicadores.
- Pañuelos desechables (servilletas).
- Cinta de celofán
- Cinta para cubrir
- Tijeras medianas
- Pinzas de punta fina
- Pinzas similares a las de depilar
- Regla metálica de 20 cm (de 1 cm de ancho)
- Pinzas de corte
- Bisturí o navaja
- Espátula de 6 a 10 cm de ancho
- Pinzas para presionar con puntas planas (pico de pato)
- Cuadrados de vidrio de 100x100x6 mm
- Cera de abeja deshidratada (como protector de humedad)
- Desengrasante (acetona, alcohol u otro)

ANEXO 3.- Manual básico para la utilización de Labview

Manual Básico para la utilización de LabVIEW



Centro de Diseño y Construcción
2005

Se ha elaborado este manual a partir de la información proporcionada en los documentos de National Instruments y en la experiencia adquirida durante el manejo de este software.

1. OBJETIVOS DE ESTE MANUAL:

- Desarrollar un procedimiento general para la utilización del LabVIEW para crear aplicaciones.
- Explicar lo que son los paneles frontales, diagramas de bloque, iconos y paneles de conexión.
- Explicar las instrucciones para la incorporación de funciones en LabVIEW.
- Dar un enfoque general del software para que los interesados puedan crear posteriormente sus propios instrumentos virtuales para registrar mediciones de diversos transductores.

SECCIÓN I. DISCUSIÓN GENERAL SOBRE LabVIEW.

2. COMPONENTES DE LabVIEW.

Los programas en LabVIEW son también nombrados instrumentos virtuales (IVs). Cada instrumento virtual consta de tres partes:

a) Panel frontal.

Es el medio por el cual el usuario interactúa con el IV. En el panel frontal el usuario puede manipular el programa, cambiar entradas y ver datos actualizados en tiempo real. Cabe mencionar que los controles son utilizados como entradas como por ejemplo, apagar un switch o parar un programa. Los indicadores son utilizados como salidas, como los termómetros, luces y otros indicadores. Cada indicador del panel frontal tiene una terminal que corresponde al diagrama de bloques. Cuando un IV se ejecuta, los valores de los controles fluyen a través del diagrama de bloques, en donde son empleados por las funciones del diagrama, y los resultados son transmitidos a otras funciones o indicadores.

En la figura 1 se muestra un switch de poder (encendido o apagado), con control booleano. Un valor booleano contiene tanto un valor verdadero como uno falso. El valor es falso hasta que el switch se presiona, cuando el switch se presiona, el valor se convierte en verdadero. El indicador del historial de temperatura es una gráfica de forma de onda. Ésta gráfica muestra diferentes valores. En este caso, la grafica señalará grados Fahrenheit contra tiempo (seg.).

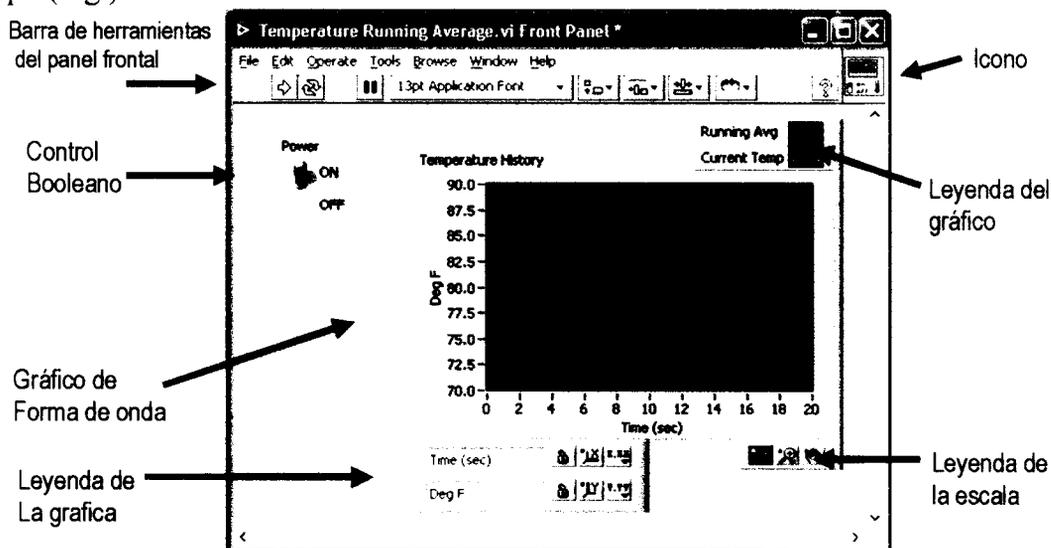


Figura 1. Componentes del panel frontal (NI, 2005).

b) Diagrama de bloque.

Es el código que controla el programa. El diagrama de bloque contiene el código fuente gráfico. Los objetos del panel frontal aparecen como terminales en el diagrama de bloque. Adicionalmente, el diagrama de bloque contiene funciones incorporadas en las bibliotecas del LabVIEW. Los cables conectan cada uno de los nodos en el diagrama de bloques, incluyendo controles e indicadores de terminal, funciones y estructuras.

En la figura 2 se muestra un ejemplo de diagrama de bloque, el subIV **Temp** llama a la subrutina la cual obtiene una temperatura desde una tarjeta de adquisición de datos (DAQ). Esta temperatura es graficada junto con el valor promedio de la temperatura en la gráfica de forma de onda **Temperature History**. El switch de poder (**Power**) es un control booleano en el panel frontal el cual va a detener la ejecución de la función "While Loop". La función "While Loop" también contiene una función de tiempo para controlar que tan frecuentemente la estructura se repite.

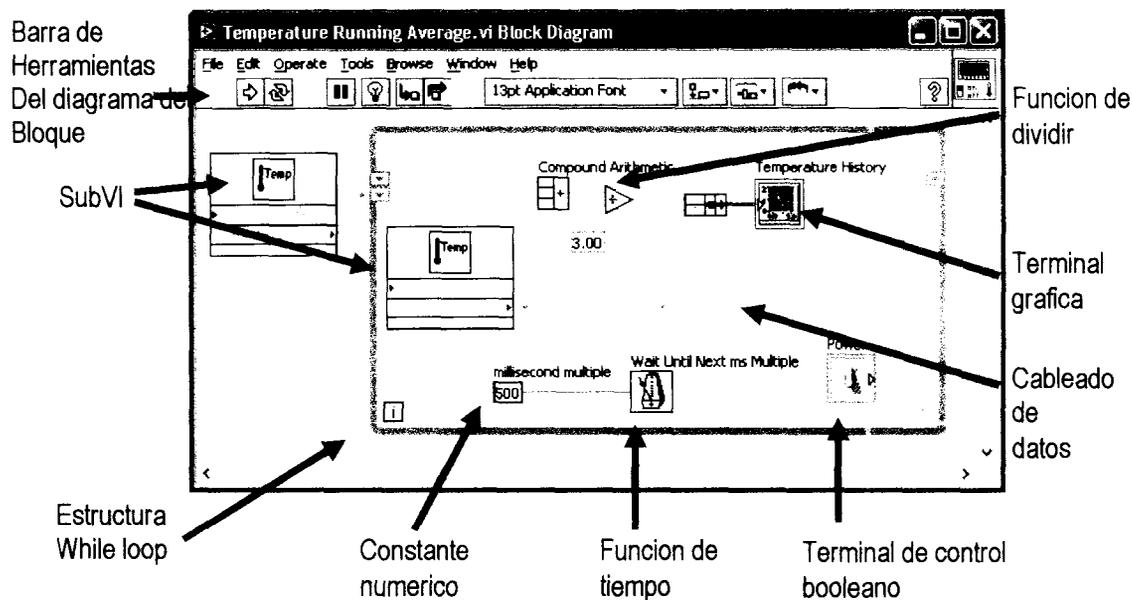


Figura 2. Ejemplo de un diagrama de bloque (NI, 2005).

c) Icono/Conector.

Son los mecanismos para conectar un IV con otros IVs. El LabVIEW 7.0 introduce un nuevo tipo de subIV llamado "Express VIS". Estos son instrumentos virtuales interactivos que tienen una configuración de caja de diálogo que permite personalizar la funcionalidad del IV Expreso. LabVIEW entonces genera una subIV basado en estos argumentos. IVs estándar son aquellos IVs que consisten de un panel frontal y un diagrama de bloque que son usados adentro de otro IV. Las funciones son los bloques de construcción de todos los IVs. Las funciones no tienen un panel frontal o un diagrama de bloque.

3. PALETA DE CONTROLES Y FUNCIONES

La paleta de controles (**Controls**) permite colocar los controles e indicadores en el Panel frontal. La paleta de controles está disponible solamente en el panel frontal. Para desplegar la paleta de controles se realiza lo siguiente:

Seleccionar Window»Show Controls palette o dar click derecho en el espacio de trabajo.

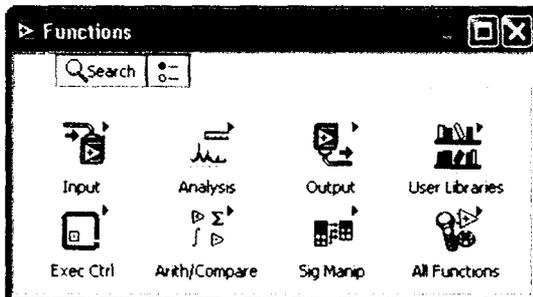
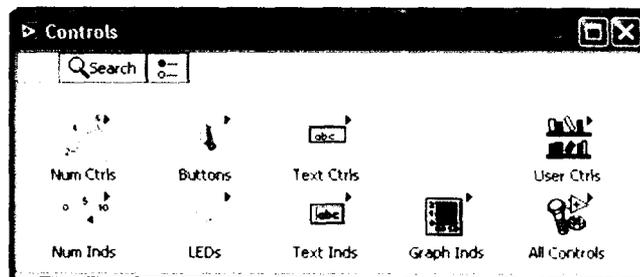
El usuario también puede desplegar la paleta de controles haciendo un clic derecho en un área abierta del panel frontal. Para desaparecer la paleta de controles presione el botón en la parte superior izquierda de la paleta.

La paleta de funciones (**Functions**) se utiliza para construir un diagrama de bloque. La paleta de funciones está disponible solamente en el diagrama de bloque. Para desplegar la paleta de funciones se sigue lo siguiente:

Seleccionar Window»Show Functions Palette o dar click derecho en el espacio de trabajo del diagrama de bloque para desplegar la paleta de funciones.

También se puede desplegar la paleta de funciones dando click derecho en un área abierta del diagrama de bloques. Para desaparecer la paleta de funciones presione el botón en la parte superior izquierda de la paleta. En la figura 3 se muestran las paletas de control y funciones.

Paletas de control (Ventana del panel frontal)



Paleta de funciones (Ventana de diagrama de bloque)

Figura 3. Paletas de control y de funciones (NI, 2005).

4. PALETA DE HERRAMIENTAS.

En caso que la herramienta de selección automática esté habilitada y se puede mover el cursor sobre un objeto en el panel frontal o en el diagrama de bloque, LabVIEW automáticamente selecciona la herramienta correspondiente de la paleta de controles. Para cambiar a la herramienta de selección automática se da click en el botón de Selección de Herramienta Automática en la paleta de Herramientas. La figura 4 muestra la paleta de herramientas.

Las herramientas mostradas en el menú se utilizan en los siguientes casos:

- La herramienta de operación se utiliza para cambiar valores o para seleccionar texto de un control.
- La herramienta de posicionamiento para seleccionar, mover o redimensionar objetos. Ésta herramienta cambia las formas cuando se mueve sobre una esquina de un objeto reajutable.
- La herramienta de etiquetado para editar textos y crear etiquetas libres. La herramienta de etiquetado se convierte en cursor cuando usted crea etiquetas libres.
- La herramienta de cableado se emplea para unir (“cablear”) objetos en el diagrama de bloque.

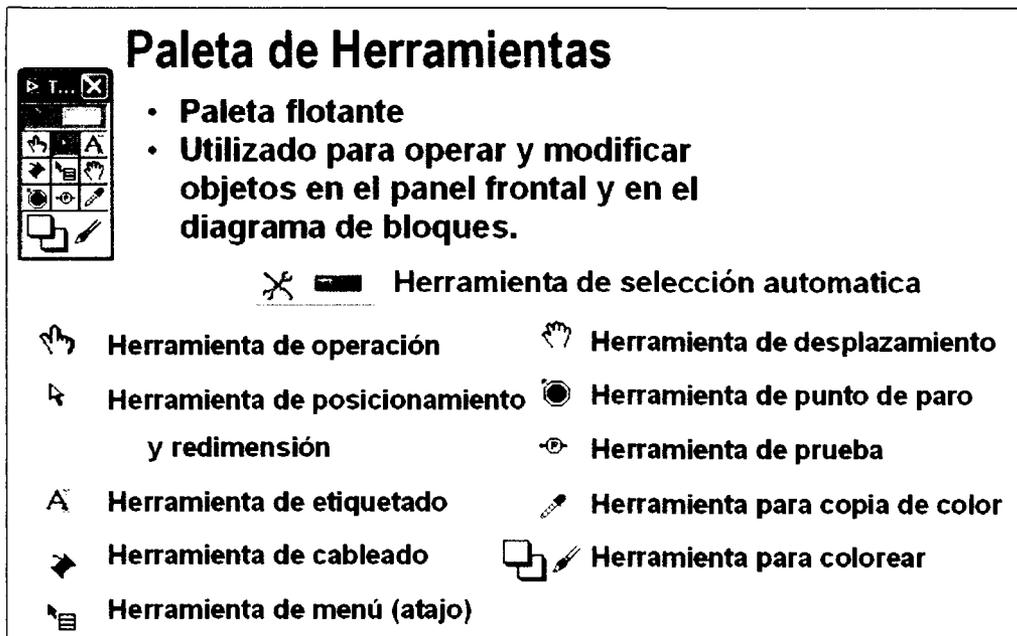


Figura 4. Paleta de herramientas (NI, 2005).

5. BARRA DE HERRAMIENTAS DE ESTADO.

A continuación se explicarán las funciones de los botones de la barra de herramientas de estado (ver figura 5):

- El botón de ejecución (**Run**) se utiliza para ejecutar el IV. Mientras el IV se está ejecutando, el botón de ejecución aparecerá con una flecha negra si es que el IV es un instrumento virtual principal, lo que significa que no ha sido llamado por otro IV y por lo tanto éste no es un subIV.
- El botón de ejecución continua (**Continuous Run**) se utiliza para ejecutar el IV hasta que el botón de cancelación de ejecución o de pausa sea presionado. También se puede pulsar este botón nuevamente para deshabilitar la ejecución continua.
- Mientras el IV se está ejecutando, el botón de cancelación de ejecución (**Abort Execution**) aparece. Se presiona éste botón para detener el IV inmediatamente.
- Se deberá evitar el empleo del botón de cancelación de ejecución (**Abort Execution**) para detener el IV. Ya sea que se deje que el IV complete su flujo de datos o se diseñe un método para detener el IV de forma programada. Al hacer esto el IV se encuentra en un estado conocido.
- El botón de pausa (**Pause**) funciona para detener momentáneamente la ejecución de un IV. Cuando se presiona el botón de pausa, LabVIEW señala la posición donde se detuvo la ejecución en el diagrama de bloque. Para reanudar simplemente se pulsa el botón de Pausa nuevamente para que el IV continúe ejecutándose.
- El menú Configuración de Textos (**Text Settings**) permite cambiar el tipo de fuente (letra) del IV, incluyendo el tamaño, estilo y color.
- El menú Alineamiento de Objetos (**Align Objects**) se utiliza para alinear objetos con respecto a los ejes, incluyendo eje vertical, superior, izquierdo, etc.
- El menú Distribución de Objetos (**Distribute Objects**) se emplea para espaciar objetos uniformemente, incluyendo espacios vacíos, compresiones, etc.
- La opción Redimensionamiento de Objetos (**Resize Objects**) se aplica para cambiar el tamaño.
- El menú Reordenamiento (**Reorder**) se usa cuando se tienen objetos superpuestos unos con otros y se quiere definir que objeto se encuentra enfrente del otro. Para ello se selecciona uno de los objetos con la herramienta de posicionamiento y se escoge entre **Move Forward** (mover hacia adelante), **Move Backward** (mover hacia atrás), **Move to Front** (mover al frente) y **Move to Back** (mover hacia atrás)

- El botón de ejecución resaltada (**Highlight Execution**) sirve para ver el flujo de información en el diagrama de bloques. Al pulsar el botón nuevamente se detendrá este tipo de ejecución resaltada.
- El botón de **Step Into** permite entrar a un paso de un ciclo, subIV, etc. Entrando un paso a la vez en un IV permite introducirse en cada paso del nodo. Cada nodo se resalta para señalar cuando esta listo para ejecutarse.
- El botón de **Step Over** se aplica para posicionarse sobre de un ciclo, un subIV, etc. Al posicionarse encima del nodo, se ejecuta el nodo sin entrar paso a paso. Éste botón también se emplea para salir de un ciclo, subIV, etc. Al posicionarse fuera del nodo, se completa la ejecución del nodo y puede moverse al siguiente nodo.



Figura 5. Barra de herramientas de estado (NI, 2005).

6. INSTRUCCIONES PARA ABRIR Y EJECUTAR UN INSTRUMENTO VIRTUAL.

Un instrumento virtual se abre siguiendo los siguientes pasos:

1. Seleccionar **Start » Programs » National Instruments » LabVIEW 7.0 » LabVIEW** para abrir LabVIEW. Aparecerá la ventana de dialogo de LabVIEW.
2. Si se quiere abrir un ejemplo, se debe seleccionar **Find Examples** del menú de ayuda (Help). La ventana de dialogo que aparece da la lista y enlaces a todos los IVs de ejemplo de LabVIEW. Se puede buscar un ejemplo por categorías, o se puede utilizar palabras claves en su búsqueda. Al dar click en cualquier programa se aprecia una descripción detallada del ejemplo. Con un doble click sobre el programa, éste se abre.
3. Si se desea abrir un IV creado por el usuario, simplemente se selecciona de la carpeta correspondiente y se le da doble click.

7. CREACIÓN DE UN INSTRUMENTO VIRTUAL.

Al crear un objeto en el panel frontal, una terminal es generada en el diagrama de bloques. Estas terminales dan acceso a los objetos del panel frontal del código creado mediante el diagrama de bloque. Cada terminal contiene información útil referente al objeto al cual corresponde en el panel frontal. Por ejemplo, el color y los símbolos proporcionan el tipo de dato. Números de punto flotante y de doble-precisión, son representados con terminales anaranjadas y las letras DBL. Las terminales booleanas son verdes y son representadas por las letras TF. En general, las terminales anaranjadas deben unirse (“cablearse”) con las terminales anaranjadas, verdes con verdes, y así sucesivamente. En la figura 6 se aprecia el cableado de un conjunto de terminales naranjas.

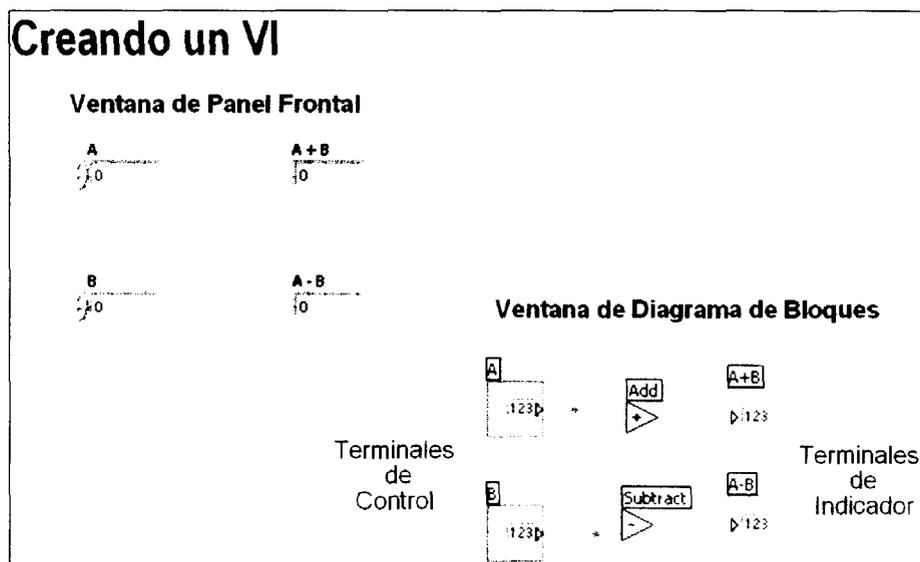


Figura 6. Cableado entre terminales del mismo tipo (NI, 2005).

Lo anterior no es una regla general; por ejemplo LabVIEW permitirá al usuario conectar una terminal azul (valor entero) a una terminal anaranjada (valor fraccional). Pero en la mayoría de casos, es mejor buscar una igualdad en colores. Los controles tienen una flecha en el lado derecho y tienen un borde grueso. Los indicadores tienen una flecha en el lado izquierdo y un borde fino. Reglas lógicas pueden ser aplicadas al conectar en LabVIEW: Cada cable debe tener una (pero solo una) fuente (o control), y cada cable puede tener varios destinos (o indicadores).

Además de las terminales del panel frontal, el diagrama de bloques contiene funciones (ver figura 7). Cada función puede tener múltiples terminales de entradas y salidas. La conexión de estas terminales es una parte muy importante de la programación en LabVIEW.

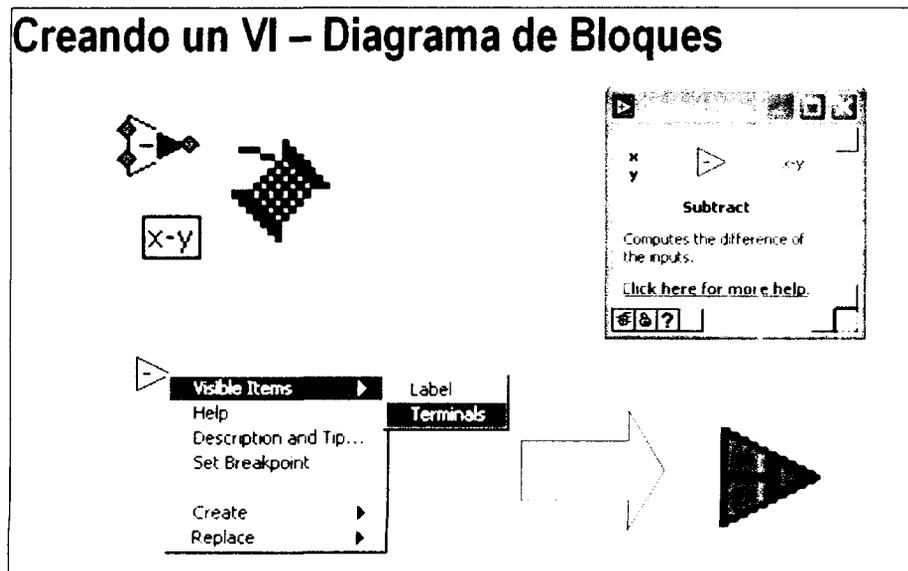


Figura 7. Funciones dentro del diagrama de bloques (NI, 2005).

En seguida se dan algunas recomendaciones para realizar la conexión de cables (ver figura 8):

- La herramienta de cableado es utilizada para conectar a los nodos de las funciones. Cuando se apunte con la herramienta de cableado, se deberá apuntar con el extremo del cable que cuelga del carrete para ser colocado.
- Al mover la herramienta de cableado sobre las funciones, se observará la viñeta amarilla que aparece sobre la función. Esto expondrá el nombre de la terminal a la que se esta conectando.
- Mientras se mueva la herramienta de cableado encima de una terminal, esta va a mostrar información. Esto ayudara a identificar donde se va a unir el cable.
- Para más ayuda con los terminales, se puede dar click derecho en la función y seleccionar **Visible Items>>Terminals**. Un dibujo de la función será mostrado para

revelar las terminales de la conexión. Se recomienda notar los colores - estos corresponden a los tipos de datos utilizados por los terminales del panel frontal. Para ayuda adicional, se puede seleccionar **Help >> Show Context Help**, o presionar **CTRL+H**. Esto mostrará la ventana de ayuda en contexto. A medida que se mueva el ratón sobre la función, esta ventana mostrará la función, terminales, y una breve descripción.

- En el caso donde el cableado no se mira muy bien, se puede dar click derecho en el cable que se desea arreglar y escoger la opción de **Clean Up Wire** para que automáticamente el cable dibuje su ruta de nuevo.

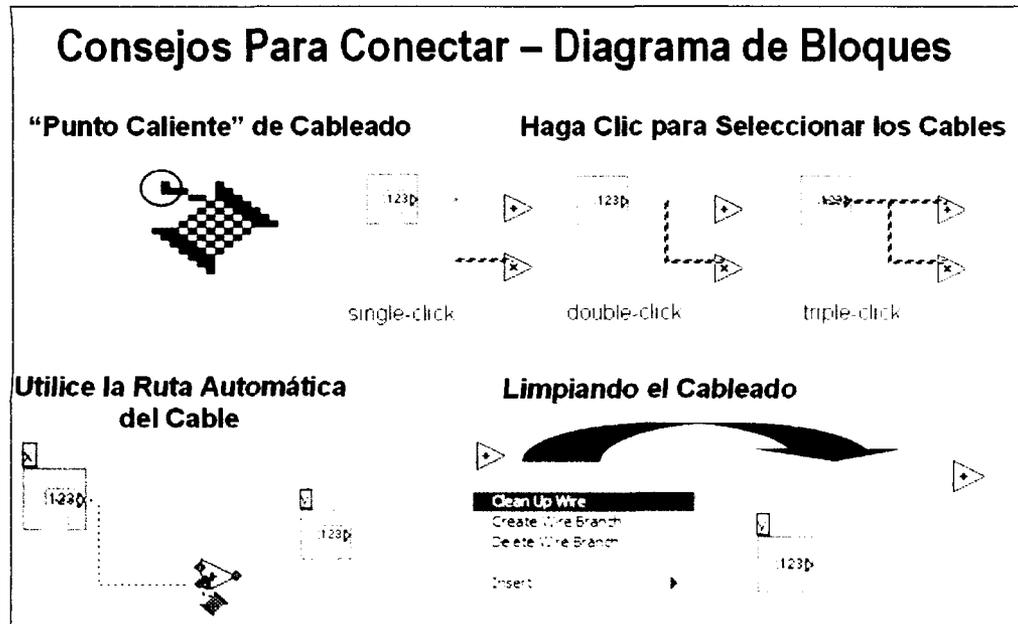


Figura 8. Consejos para cablear correctamente un IV (NI, 2005).

El cableado es muy flexible en LabVIEW. A continuación se muestran algunas de las características más utilizadas:

- Dar un simple, doble, y triple click en el cable selecciona el cable para moverlo o para borrarlo.
- Dar un click mientras se está cableando hace un doblez en el cable.
- Dando click derecho o presionando el botón **Esc** mientras se está cableando cancela la operación de cableado.
- No hay que preocuparse por el color de los cables. LabVIEW seleccionará automáticamente el cable correcto y adecuado para cada situación.

8. CABLEADO AUTOMÁTICO DE OBJETOS.

LabVIEW cablea automáticamente los objetos colocados en el diagrama de bloque. También se pueden cablear automáticamente objetos que ya están colocados en el diagrama de bloque. LabVIEW conecta la terminal que mejor combina y deja las terminales que no combinan sin conectar. A medida que se mueve un objeto seleccionado cerca de otros objetos en el diagrama de bloque, LabVIEW dibuja cables temporales para mostrar conexiones posibles validas. Cuando se suelta el botón del ratón para poner el objeto en el diagrama de bloque, LabVIEW conecta automáticamente los cables.

Para cambiar al cableado automático se presiona la barra de espacio mientras se mueve un objeto mediante la herramienta de posicionamiento (Positioning tool). Es posible ajustar las opciones del cableado automático seleccionando **Tools >> Options** y seleccionando **Block Diagram** del menú superior principal.

LabVIEW sigue un modelo de flujo de datos para correr los IVs. Un nodo del diagrama de bloque se ejecuta cuando todas sus entradas están disponibles. Cuando un nodo completa la ejecución, suministra datos a sus terminales de salida y pasa los datos de salida al siguiente nodo en la trayectoria del flujo de datos. En flujo de control, el orden secuencial de los elementos del programa determina el orden de ejecución de un programa.

Por ejemplo, se observa el diagrama de bloque que se encuentra en la figura 9. En este flujo se suman dos números y luego se resta un número aleatorio del resultado de la suma. En este caso, el diagrama de bloque se ejecuta de izquierda a derecha, no porque los objetos están puestos en ese orden, sino porque una de las entradas de la función de resta no es valida hasta que la función de suma o adición haya terminado su ejecución y pasado los datos a la función de resta.

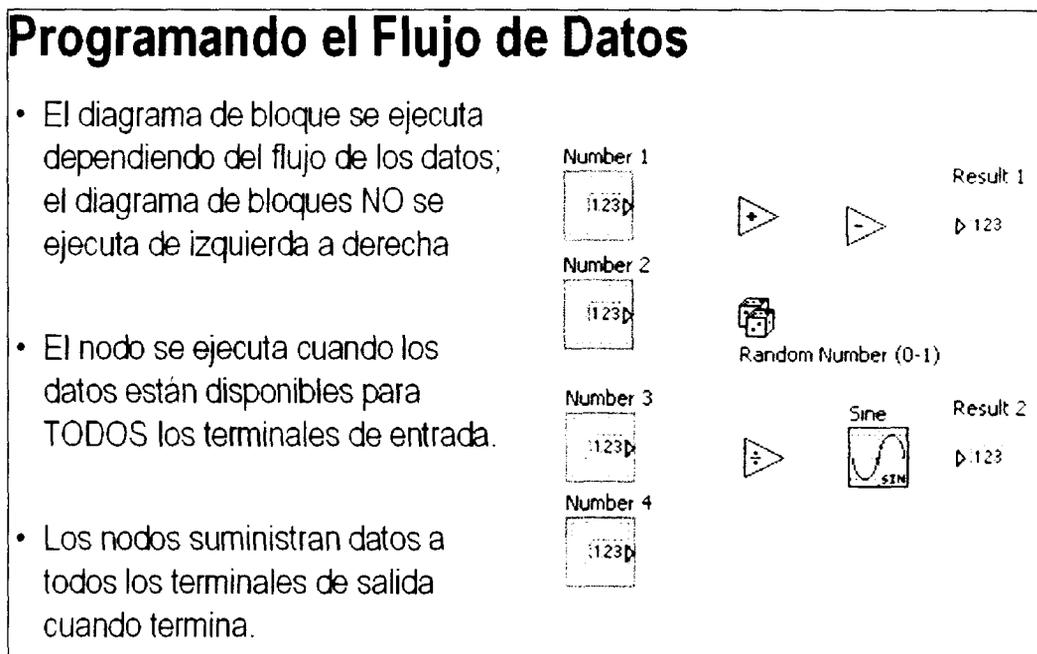


Figura 9. Flujo de datos en LabVIEW (NI, 2005).

9. VENTANA DE AYUDA CONTEXTUAL (CONTEXT HELP WINDOW).

Para desplegar la ventana de **Context Help**, se selecciona **Help>>Show Context Help** o también se pueden presionar las teclas <Ctrl-H>. Cuando se mueve el cursor sobre el panel frontal y los objetos del diagrama de bloque, la ventana de **Context Help** desplegará el icono de las subIVs, funciones, constantes, controles e indicadores, con cables adjuntos a cada una de sus terminales. Cuando se mueve el cursor sobre la caja de opciones de dialogo, la ventana de **Context Help** se desplegarán descripciones de esas opciones. En la ventana, las conexiones requeridas estarán en negrilla, las conexiones recomendadas en texto normal, y las conexiones opcionales poco claras o no aparecerán.

En la figura 10 se presenta un ejemplo de la ventana de **Context Help**.

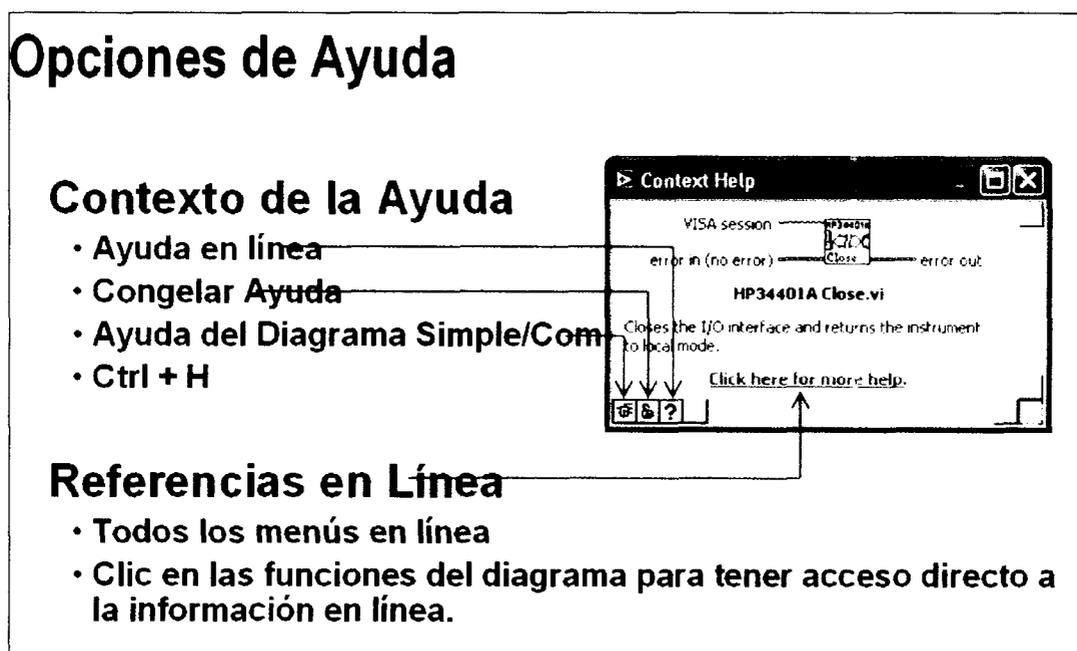


Figura 10. Ventana de Ayuda (NI, 2005).

Para distinguir entre la ayuda contextual simple y detallada se da un click en el botón de **Simple/Detailed Context Help** localizado en la esquina inferior izquierda de la ventana de **Context Help**. El modo simple enfatiza las conexiones importantes. Las terminales opcionales son mostradas por segmentos de cables, informando de la existencia de otras conexiones.

Para congelar el contenido actual de la ventana de la **Context Help** se da un click en el botón de **Lock Context Help**. Cuando los contenidos están congelados, el mover el cursor sobre otros objetos no cambia los contenidos de la ventana. Para descongelar la ventana, se hace un click nuevamente en el botón.

Para desplegar el tema correspondiente en **LabVIEW Help** se hace click en el botón de **More Help**, el cual describe el objeto en forma detallada.

10. LABVIEW HELP (AYUDA DE LABVIEW).

Se puede acceder a LabVIEW Help ya sea dando click en el botón de More Help en la ventana de Context Help, seleccionando **Help»VI, Function, & How-To Help**, haciendo clic en la oración **Click here for more help** en la ventana de **Context Help** o presionando <Ctrl-?>.

El **LabVIEW Help** contiene descripciones detalladas de casi todos los menús, herramientas, IVs y funciones. También incluye instrucciones paso-a-paso para la utilización de muchas características de LabVIEW, versiones en PDF de todos los manuales y Notas de Aplicación de LabVIEW, además de recursos de soporte técnico en el sitio web de Nacional Instruments.

11. TÉCNICAS PARA ELIMINAR ERRORES.

Cuando su IV no es ejecutable, se despliega una flecha quebrada en el botón de *Run* en la paleta de herramientas.

- **Encontrando los Errores:** Para hacer una lista de los errores, se hace click en la flecha quebrada. Para localizar el objeto malo, se da un click en el mensaje del error.
- **Resaltando la Ejecución:** Anima el diagrama y traza el flujo de datos, permitiendo ver los valores intermedios. Haciendo clic en el foco incandescente (**Light bulb**) en la barra de herramientas.
- **Ver los arreglos:** Utilizado para ver los valores en los arreglos y clusters. Con un click en los cables con la herramienta **Probe** o click derecho en el cable para ajustar los “probes”.
- **Punto de Paro (Breakpoint):** Coloca pausas en diferentes lugares del diagrama. Con un clic en los cables o en los objetos con la herramienta de **Punto de Paro** se colocan dichos puntos.

SECCIÓN II

SubIVs.

1. DEFINICIÓN DE SubIVs.

Después de haber construido un IV, y creado su propio icono y panel de conexión, este puede ser utilizado en otro IV. Un IV dentro de otro IV se llama un sub instrumento virtual. Un subIV corresponde a una subrutina en lenguajes de programación basados en texto. La utilización de subIVs ayuda a manejar cambios y a eliminar los errores del diagrama de bloque rápidamente. En la figura 11 se muestra un subIV.

Cada IV muestra un icono, mostrado arriba, en la esquina superior derecha de las ventanas del panel frontal y del diagrama de bloque. Un icono es una representación grafica de un IV. Puede contener texto, imágenes, o una combinación de ambos. Si se utiliza un IV como subIV, el icono identifica el subIV en el diagrama de bloque del IV.

El conector muestra terminales disponibles para la transferencia de datos hacia y desde el subIV. Hay varios patrones de conectores para elegir. Para seleccionar un patrón del menú se da un click-derecho sobre él. A partir de ahí se pueden asignar controles e indicadores en el panel frontal al conector terminal.

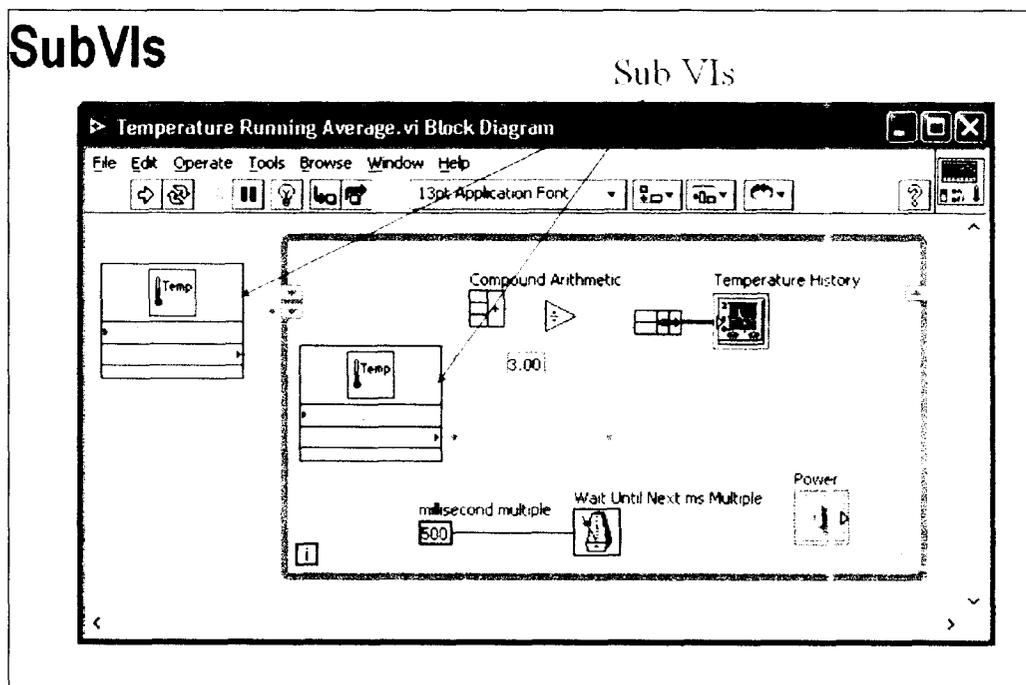


Figura 11. Imagen de un sub instrumento virtual (NI, 2005).

2. PASOS PARA CREAR UN SubIV.

a) *Crear el icono.* Se pueden crear iconos personalizados para reemplazar los iconos predeterminados al dar click derecho en la esquina superior derecha del panel frontal o del diagrama de bloques y seleccionando **Edit Icon** del menú de atajo o dando un doble click en el icono en la esquina superior derecha del panel frontal. También se puede corregir iconos seleccionando **File >> VI Properties**, seleccionando **General** del menú **Category**, y dando click en el botón de editar (**Edit Icon**). Para crear el diseño de un icono se utilizan las herramientas del lado izquierdo de la casilla de dialogo del **Icon Editor** para crear en el área de edición. El tamaño normal de la imagen del icono aparece en la casilla apropiada en la parte derecha del área de edición. Otra opción es la de arrastrar un gráfico desde cualquier archivo y colocarlo en la esquina superior derecha del panel frontal o del diagrama de bloque. En la figura 12 se muestra el editor de iconos.

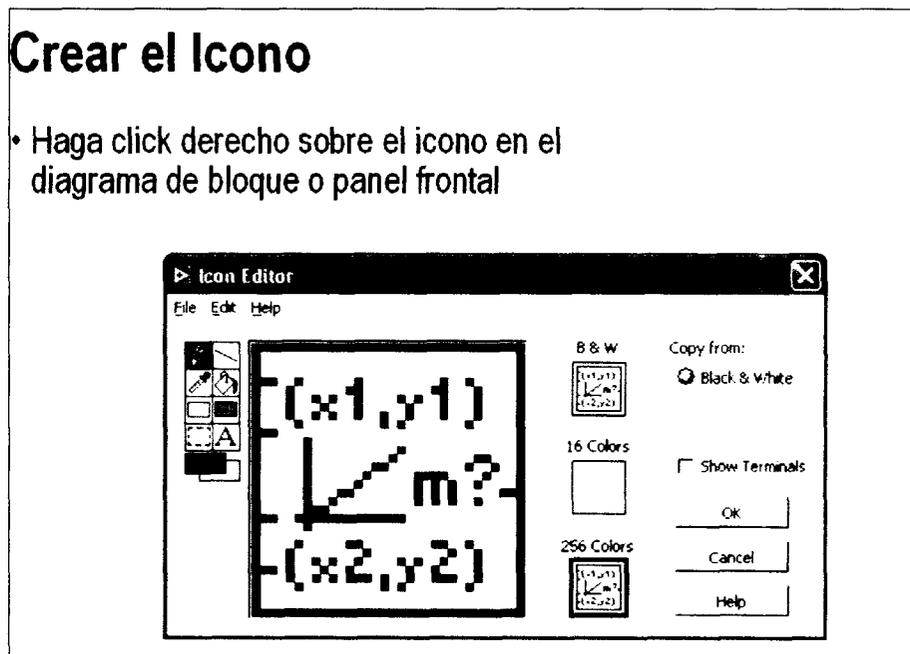


Figura 12. Editor de iconos (NI, 2005).

b) *Crear el conector.* El conector es una serie de terminales que corresponden a los controles y a los indicadores de un IV, similar a la lista de parámetros de una función basada en un lenguaje de programación de texto. El conector define las entradas y las salidas que se pueden cablear al IV para que pueda utilizarse como subIV. Las conexiones se definen asignando un control del panel frontal o un indicador a cada una de las terminales del conector. Para definir un conector, se da un click derecho sobre el icono en la esquina superior derecha de la ventana del panel frontal y se selecciona **Show Connector** del menú. El conector substituye el icono. Cada rectángulo en el conector representa una terminal. Los rectángulos se utilizan para asignar entradas y salidas. El número de terminales que LabVIEW muestra en el conector depende del número de controles e indicadores en el panel frontal. En la figura 13 se ilustra lo anterior.

Crear el Conector

Haga click derecho sobre el icono (solamente en el panel frontal)

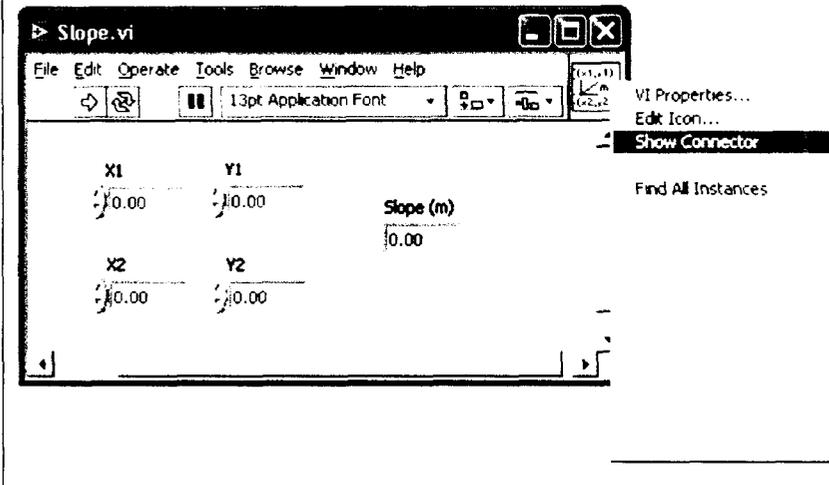


Figura 13. Creación del conector (NI, 2005).

c) *Asignar terminales.* Después de seleccionar un patrón para utilizar en el conector, se debe definir las conexiones asignando un control del panel frontal o indicador a cada uno de las terminales del conector. Cuando se hacen vínculos entre controles e indicadores y el conector, se colocan las entradas en la izquierda y las salidas a la derecha para evitar patrones complicados y poco claros en el IV. Para asignar una terminal a un control de panel frontal o indicador, se presiona una terminal del conector. Se presiona el control del panel frontal o indicador que se desea asignar a la terminal. Se da click en un área abierta del panel frontal. La terminal cambia al color del tipo de datos del control para indicar que se conectó la terminal. En la figura 14 se ilustra la asignación de terminales.

Asignar Terminales

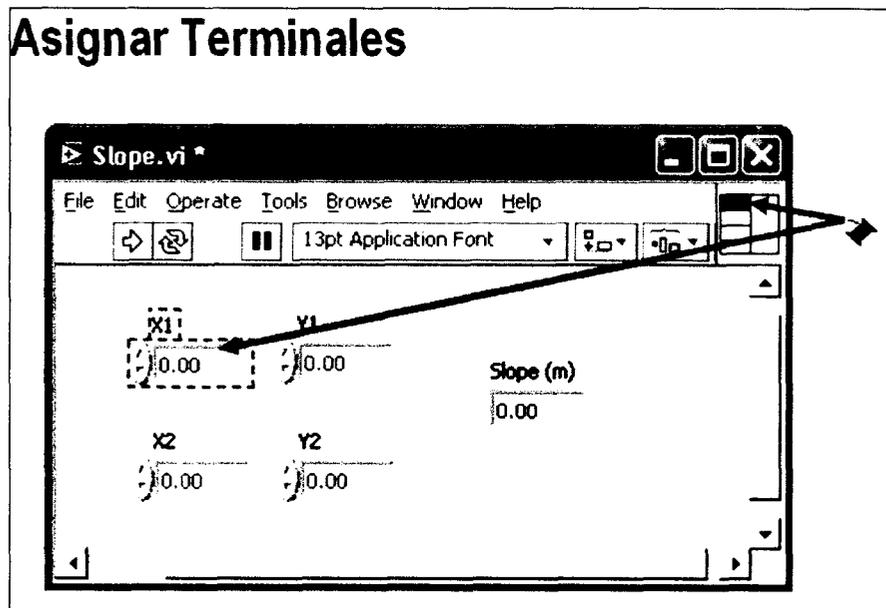


Figura 14. Asignación de terminales (NI, 2005).

d) *Salvar el IV.* Hay varias maneras de organizar los subIVs. La manera más común es organizarlos por aplicación. En este caso, son salvados en el mismo directorio o dentro de un archivo de librería de IV todos los IV s para una aplicación en particular. Salvarlos en un archivo de librería permite que se transporte una aplicación entera dentro de un solo archivo. Después de presionar **Save As** (salvar como), se presiona **New VI Library** (nueva librería de VI). Esto permitirá que nombre la librería, y entonces salvar el IV en él. Para agregar IVs subsecuentes, simplemente se da doble click al archivo.

e) *Insertar un IV dentro de un IV principal.* Después de construir un IV y crear su icono y conector, se puede utilizar como un subIV. Para colocar un subIV en el diagrama de bloque, se selecciona **Functions >> Select a VI**. Se da un doble click en el IV que se desea utilizar como subIV y se coloca en el diagrama de bloques. También se puede colocar un IV abierto en el diagrama de bloque de otro IV abierto usando la herramienta de colocación "Positioning Tool" para hacer click en el icono en la esquina superior derecha del panel frontal o diagrama de bloque del IV que se desea utilizar como subIV y arrastrar el icono al diagrama de bloque del otro IV. En la figura 15 se muestra la inserción de un IV dentro de un IV principal.

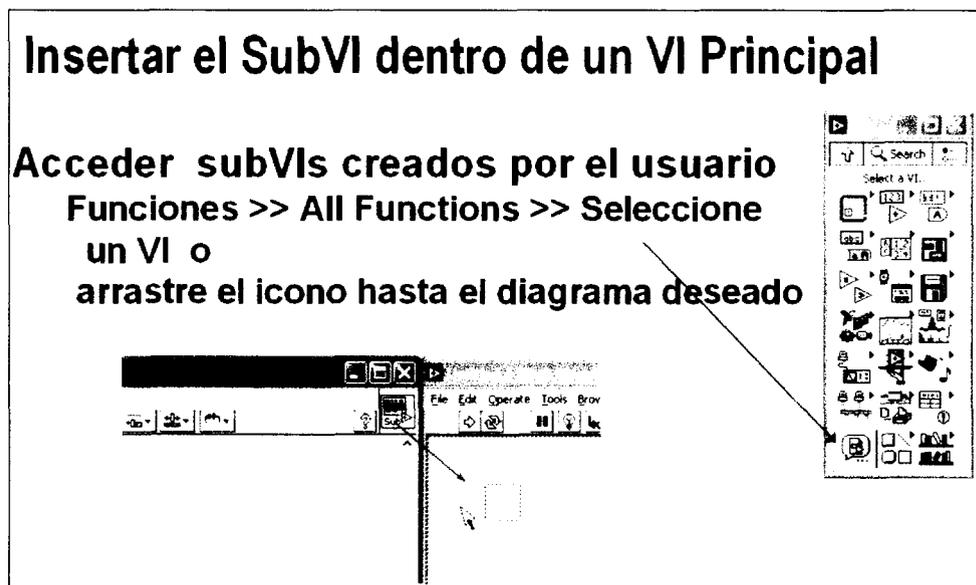


Figura 15. Inserción de un IV dentro de un IV principal (NI, 2005).

3. CONSEJOS PARA TRABAJAR EN LabVIEW.

- *Atajos desde el teclado:*
 - <Ctrl-H> - Activa/Desactiva la ventana de Ayuda.
 - <Ctrl-B> - Remueve todos los cables rotos del diagrama de bloques.
 - <Ctrl-E> - Cambiar entre el panel frontal y el diagrama de bloques.
 - <Ctrl-Z> - Deshacer cambios.

- *Herramientas.* La Herramienta de Selección sirve para escoger la herramienta que se desea utilizar en LabVIEW. Cuando se desean controles manuales, la tecla Tab. permite cambiar entre las herramientas más comunes (Opérate Valué, Position/Size/Select, Edit

Text, New Color on Front Panel en panel frontal), Conect on Block Diagram). Una vez que se ha terminado con la selección de herramientas, se presiona <Shift-Tab.> para activar la Herramienta de Selección Automática. En el dialogo de **Herramientas >> Opciones**, hay muchas opciones configurables para el Panel Frontal, Diagrama de Bloque, Colores, Impresión y mucho mas.

- *Propiedades del IV.* Similar a las opciones de LabVIEW, se pueden configurar propiedades específicas del IV al ir a **File >> VI Properties** Ahí se puede documentar el IV, cambiar la apariencia de la ventana, y personalizarlo de varias maneras.

SECCIÓN III. ADQUISICIÓN DE DATOS.

1. ADQUISICIÓN DE DATOS EN LabVIEW.

La plataforma de Adquisición de Datos en LabVIEW contiene una parte para la NI-DAQ tradicional y una para NI-DAQmx. Los IVs tradicionales están divididos por el tipo de medición, los IVs DAQmx están divididos por el tipo de tarea. En la figura 16 se muestra la comparativa entre los tipos de adquisición de datos.

Antes de utilizar la Adquisición de Datos de IVs se deben completar varios pasos. Los dispositivos deben ser configurados para las computadoras que los contienen:

1. El software NI-DAQ debe estar instalado en la computadora.
2. Debe tener instalada una tarjeta E-series DAQ y esta debe ser configurada usando el Explorador de Automatización & Medición (Measurement & Automation Explorer *MAX*).

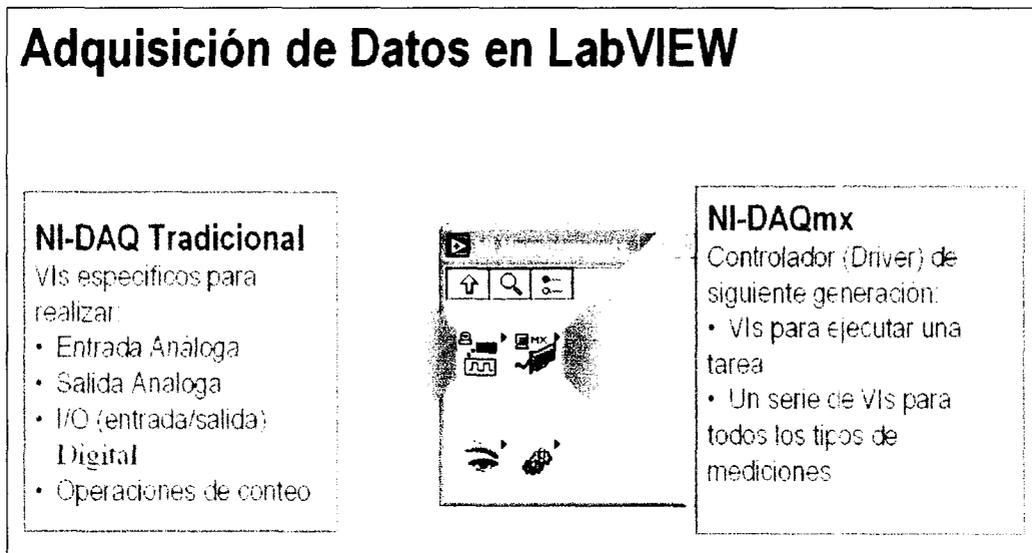


Figura 16. Comparativa entre los tipos de adquisición de datos.

2. TERMINOLOGÍA DE LA ADQUISICIÓN DE DATOS.

Resolución: Al adquirir datos a una computadora, un convertidor de Análogo a Digital (ADC) toma una señal análoga y la convierte a un número binario. Por lo tanto, cada número binario del ADC representa cierto nivel de voltaje. El ADC devuelve el nivel más alto posible sin pasar el nivel de voltaje real de la señal análoga. La resolución se refiere al número de niveles binarios que el ADC puede utilizar para representar una señal. Por lo tanto, cuanto más alta es la resolución, más son los niveles que se tienen para representar una señal.

Rango: A diferencia de la resolución del ADC, el rango del ADC es seleccionable. La mayoría de los dispositivos DAQ ofrecen un rango desde 0 - +10 o -10 a +10. Se elige el

rango cuando se configura el dispositivo en NI-DAQ. La resolución del ADC será extendida por cualquier rango que se elija. Cuanto más grande sea el rango, mas esparcida será la resolución, y tendrá una peor representación de la señal. Entonces es importante escoger el rango para apropiadamente encajar la señal de entrada.

Ganancia: Escogiendo apropiadamente el rango del ADC es una manera de asegurarse de que se esta maximizando la resolución del ADC. Otra manera de ayudar a la señal a maximizar la resolución del ADS es aplicando una ganancia. Ganancia se refiere a cualquier amplificación o atenuación de una señal. El ajuste de ganancia (*gain setting*) es un factor de escala. Cada nivel de voltaje en su señal entrante es multiplicado por el ajuste de ganancia para obtener la señal amplificada o atenuada. A diferencia de la resolución que es un ajuste fijo (*fixed setting*) del ADC, y el rango que es escogido cuando el dispositivo DAQ es configurado, la ganancia es especificada indirectamente a través de un ajuste llamado límites de entrada. Los límites de entrada se refieren a los valores máximos y mínimos de su señal de entrada analógica actual. Basado en los límites de entrada que se defina la ganancia posible más grande que mantendrá la señal entre el rango escogido del ADC es aplicada a su señal. Así que en lugar de necesitar calcular la mejor ganancia basada en su señal y en el rango escogido, todo lo que se necesita saber son los valores máximos y mínimos de la señal.

SECCION IV CICLOS Y GRÁFICAS.

1. CICLOS EN LabVIEW.

En LabView pueden utilizarse dos tipos de ciclos, **While** y **For**. Ambos ciclos están localizados en la paleta **Functions»Structures**. El ciclo *For* difiere del ciclo *While* en que el ciclo *For* ejecuta una serie de veces predeterminada. El ciclo *While* deja de ejecutar el sub diagrama solo si el valor en la condición terminal existe.

a) *Ciclo Mientras (While)*.

Similar al ciclo **Do** o al ciclo **Repeat-Until** en lenguajes de programación basados en texto, un ciclo *While* ejecuta un sub diagrama hasta que la condición sea cumplida. El comportamiento incumplido y la apariencia de la terminal dependiente (valor por defecto) es **Continue if True**. Cuando una terminal dependiente es **Continue if True**, el ciclo *While* ejecuta su sub diagrama hasta que la terminal dependiente recibe un valor FALSO. La terminal de iteración (una terminal de salida) contiene el número de iteraciones completas. El conteo de iteraciones siempre empieza en cero. Durante la primera iteración, la terminal de iteración regresa a cero. En la figura 17 se ilustra el ciclo *While*.



Figura 17. Ciclo *While* (NI, 2005)

b) *Ciclo Para (For)*.

Un ciclo *For* ejecuta una serie varias veces. El valor en la terminal de conteo (una terminal de entrada) representada por la N, indica cuantas veces se repite el sub diagrama. El conteo de iteraciones siempre empieza en cero. Durante la primera iteración, la terminal de iteración regresa a cero. En la figura 18 se ilustra el ciclo *For*.

Los ciclos se colocan en un diagrama seleccionándolos desde la paleta de Estructuras de la paleta de Funciones (demostrar). Cuando este seleccionado, el cursor del ratón se convierte en un puntero especial que se usa para encerrar la sección del código que desea repetir. Para definir el ciclo, en la esquina superior izquierda se da un click al botón del ratón y otro en la esquina inferior izquierda, y la frontera del ciclo *While* es creada alrededor del código seleccionado. En la figura 19 se ilustra la creación de un ciclo.

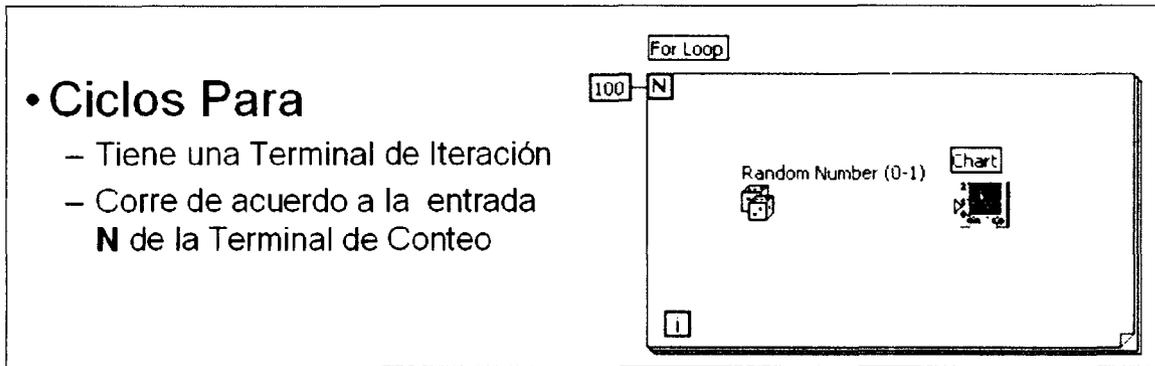


Figura 18. Ciclo *For* (NI, 2005).

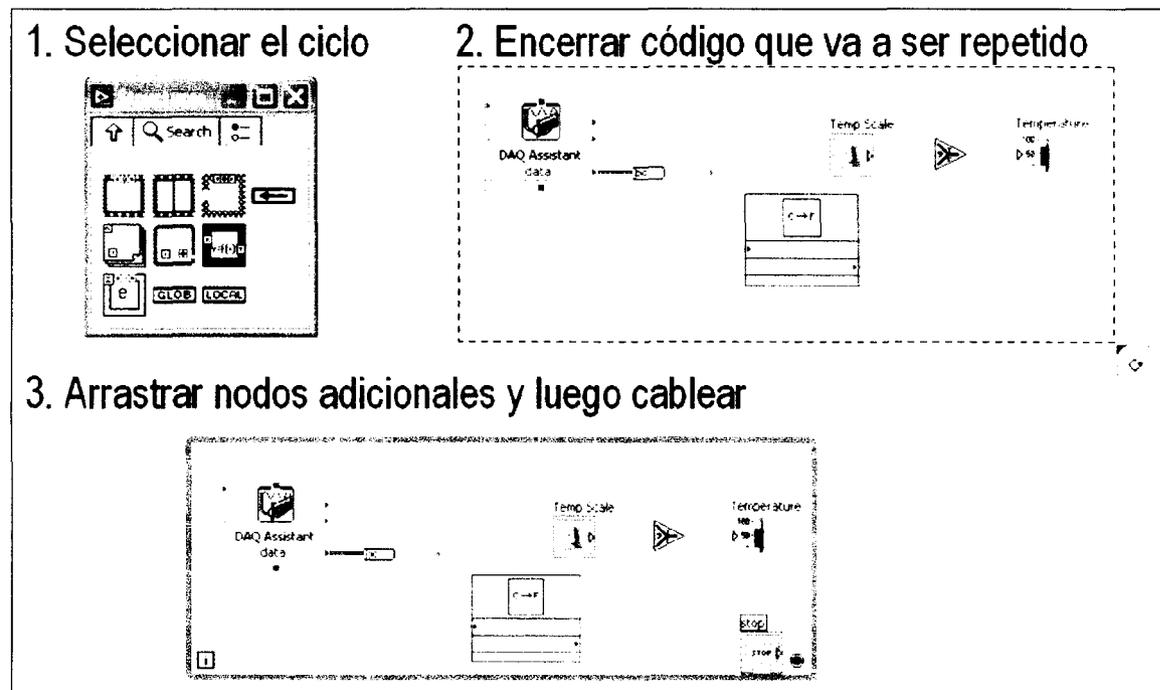


Figura 19. Creación de un ciclo (NI, 2005).

2. GRÁFICA DE FORMA DE ONDA.

La gráfica de forma de onda es un indicador numérico especial que muestra una o más graficas (plots). La grafica de forma de onda esta localizada en la paleta **Controls»Graph Indicators**. Las graficas de forma de onda pueden mostrar graficas simples o múltiples.

Se puede cambiar los valores mínimo y máximo de los ejes x, y dando doble click al valor con la herramientas de etiquetado y escribiendo el nuevo valor. Similarmente, se puede cambiar la etiqueta del eje. Con un click derecho a la leyenda de la grafica se puede cambiar el estilo, forma y color del dibujo que se muestra en la gráfica.

Se puede cablear una salida escalar directamente a una grafica de forma de onda para mostrar un diagrama. Para mostrar múltiples diagramas en una grafica, se usa la función **Merge Signals** encontrada en la paleta **Functions >> Signal Manipulation**. La función **Merge Signal** junta múltiples salidas para diagramar en la gráfica de forma de onda. Para agregar mas diagramas, se utiliza la herramienta de Posicionamiento para cambiar el tamaño de la función **Merge Signal**. La ayuda de contexto contiene muy buena información en como cablear de diferentes maneras los datos dentro de las graficas. En la figura 20 se muestra la creación de una gráfica y en la figura 21 el cableado de una gráfica.

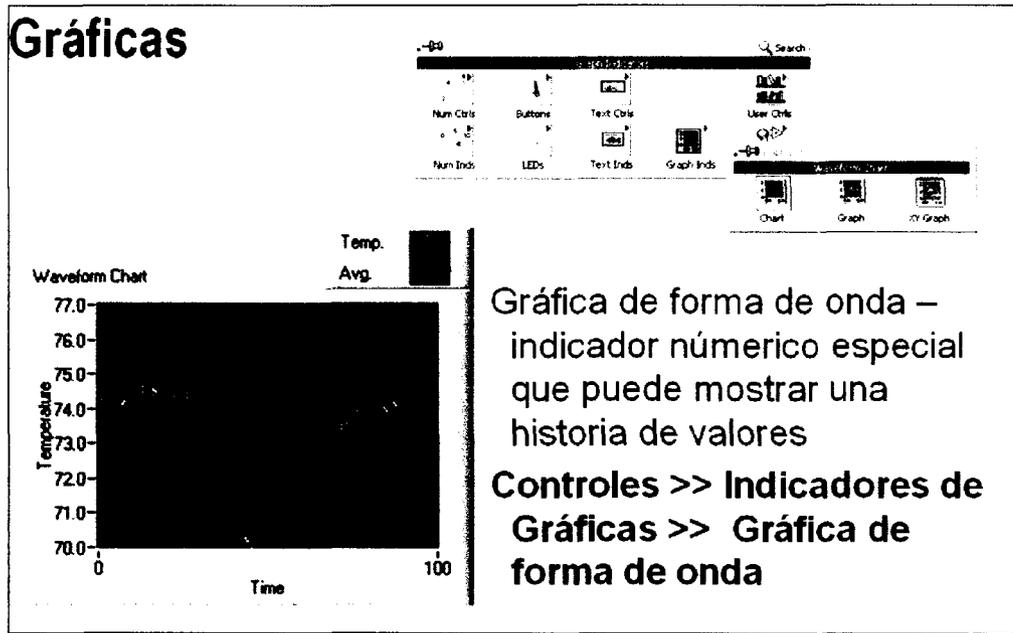


Figura 20. Creación de una gráfica (NI, 2005).

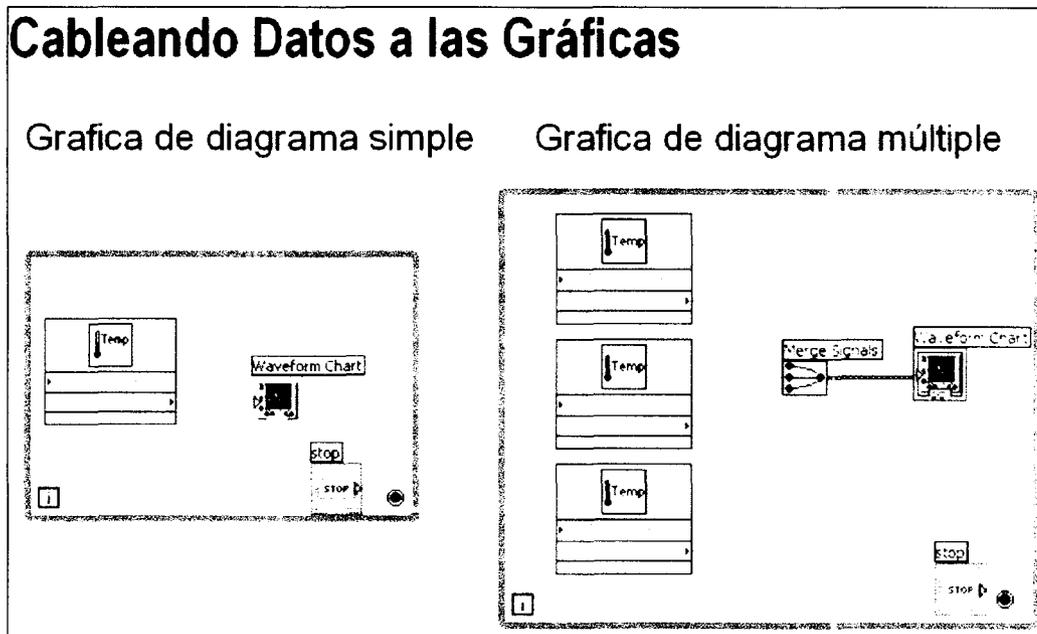


Figura 21. Cableado de una gráfica (NI, 2005).

SECCIÓN V

ARREGLOS Y MANEJO DE ARCHIVO FILE (I/O)

1. ARREGLOS Y MANEJO DE ARCHIVO (FILE I/O).

Los arreglos agrupan elementos de datos del mismo tipo. Un arreglo consiste de elementos y dimensiones. Los elementos son los datos que componen el arreglo. Una dimensión es la longitud, altura, o profundidad de un arreglo. Un arreglo puede tener una o más dimensiones y hasta $2^{31} - 1$ elementos por dimensión, si lo permite la memoria.

Se puede construir arreglos de tipos de datos numéricos, Booleanos, rutas, cadenas, formas de onda y cluster data. Los arreglos se llegan a usar cuando se trabaja con una colección de datos similares y cuando se realicen computaciones repetitivas. Los arreglos son ideales para almacenar información que se obtiene de formas de ondas o información generada en los ciclos, donde cada iteración de un ciclo produce un elemento del arreglo.

Los elementos del arreglo son ordenados. Un arreglo utiliza un índice para que se pueda tener acceso rápido a cualquier elemento en particular. El índice es basado en cero, lo que significa que tiene un rango de 0 a n, donde n es el número de elementos en el arreglo.

Las operaciones de Entrada/Salida de archivo (I/O) pasan los datos desde y a los archivos. Utilice los VI de File I/O y las funciones localizadas en la paleta **Functions » File I/O** para manejar todos aspectos de I/O de archivo.

2. CREACIÓN DE ARREGLOS.

Para crear un control o indicador de un arreglo se escoge un arreglo (array) en la paleta **Controls » All Controls » Arrays & Cluster**, se coloca en el panel frontal, y se arrastra un control o un indicador adentro de la estructura (shell) del arreglo. Se debe insertar un objeto en la estructura del arreglo antes de utilizar el arreglo en el diagrama de bloques. De otro modo, la terminal del arreglo aparece negra con un paréntesis vacío.

Para agregar las dimensiones a un arreglo de uno en uno, se da click derecho en el despliegue del índice y se selecciona **Add Dimension** del menú de atajo. También se puede utilizar la herramienta de Posicionamiento para cambiar el tamaño del despliegue del índice hasta que se tengan las dimensiones requeridas. En la figura 22 se ilustra la creación de un arreglo.

Agregando un Arreglo al Panel Frontal

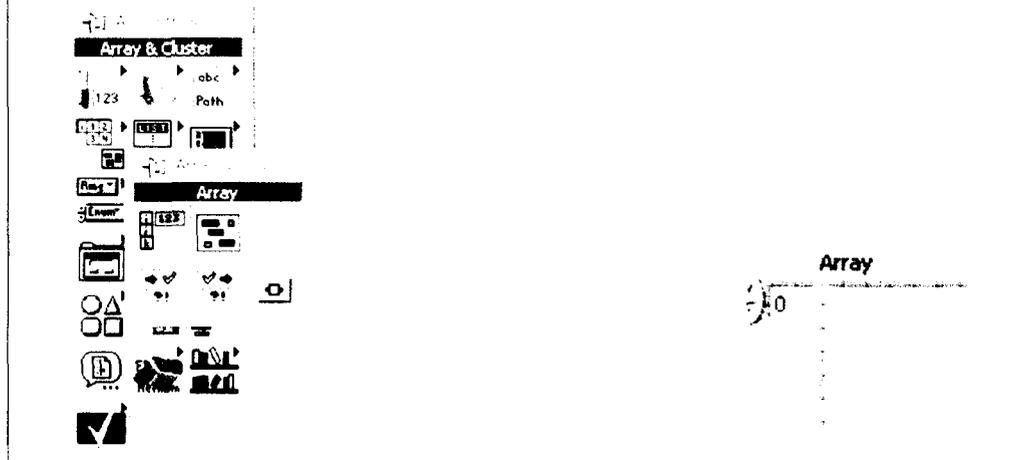


Figura 22. Creación de un arreglo (NI, 2005).

Creando arreglos con ciclos.

Si se cablea un arreglo a un túnel de entrada de un ciclo *For* o un ciclo *While*, se puede leer y procesar cada elemento en ese arreglo al activar el *auto-indexing* (auto-indicación). Cuando se utiliza el auto-índice en un arreglo de túnel de salida, el arreglo de salida recibe un nuevo elemento por cada iteración del ciclo. El cable que va del túnel de salida al arreglo indicador se vuelve mas grueso al cambiar a un arreglo en el borde del ciclo, y el túnel de salida contiene corchetes cuadrados representando un arreglo. En la figura 23 se ilustra lo anterior.

Creando un Arreglo con un Ciclo

- Los ciclos acumulan arreglos en sus limites.

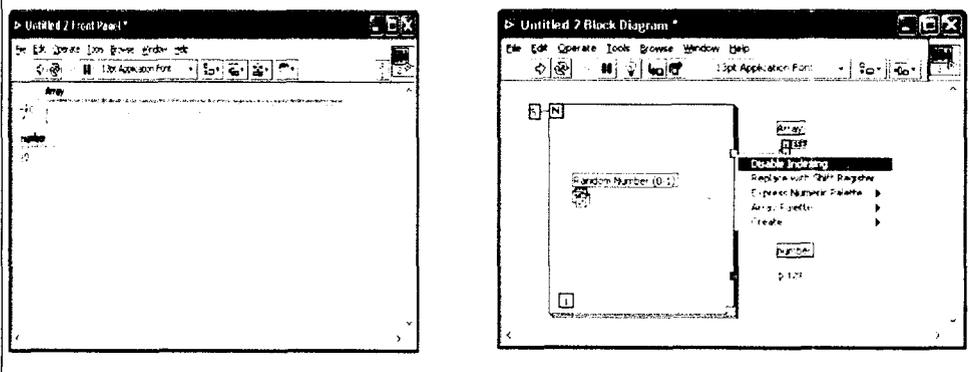


Figura 23. Creación de un arreglo con ciclo (NI, 2005).

3. ESCRITURA DE ARCHIVOS DE MEDICIÓN.

El archivo de escritura LVM puede escribir en archivos de hoja de cálculo. Sin embargo, su propósito principal es el de introducir datos, que luego serán utilizados en LabVIEW. Este IV crea un archivo .lvm que se puede abrir en una aplicación de hoja de cálculo. Para los archivos de hoja de cálculo simple, se utiliza el VIs expreso: Write LVM y Read LVM.

SECCIÓN VI FUNCIONES DE ARREGLOS Y GRÁFICOS.

1. FUNCIONES DE LOS ARREGLOS.

Las funciones de los arreglos situadas en la paleta **Functions» All Functions» Array** se utilizan para crear y para manipular arreglos. En la figura 24 se ilustran las funciones de los arreglos. Estas funciones incluyen las siguientes:

- *Array Size (Tamaño del Arreglo)* devuelve el número de elementos en cada dimensión de un arreglo. Si el arreglo es de n-dimensiones, el tamaño de la salida es un arreglo de n elementos.
- *Initialize Array (Inicializar el Arreglo)* crea un arreglo de n dimensiones en donde cada elemento ha sido inicializado al valor del elemento. Cambiar el tamaño de la función permite incrementar el número de dimensiones del arreglo de salida.
- *Build Array (Construcción del Arreglo)* conecta arreglos múltiples o añade elementos a un arreglo de n dimensiones. Para incrementar el número de dimensiones del arreglo de salida se cambia el tamaño de la función.
- *Array Subset (Subconjunto de Arreglo)* devuelve parte de un arreglo que comienza en el índice y que contiene elementos.
- *Index Array (Índice del Arreglo)* devuelve un elemento de un arreglo en el índice. También se puede utilizar la función Índice del Arreglo para extraer una fila o una columna de un arreglo bidimensional para así crear un subarreglo del original. Para hacer esto se cablea un arreglo bidimensional a la entrada de la función. Dos terminales de índice están disponibles. La terminal del índice superior indica la fila, y la segunda terminal indica la columna. Se pueden cablear entradas a ambas terminales de índice para indicar un solo elemento, o se puede cablear solamente una terminal para extraer una fila o una columna de datos.

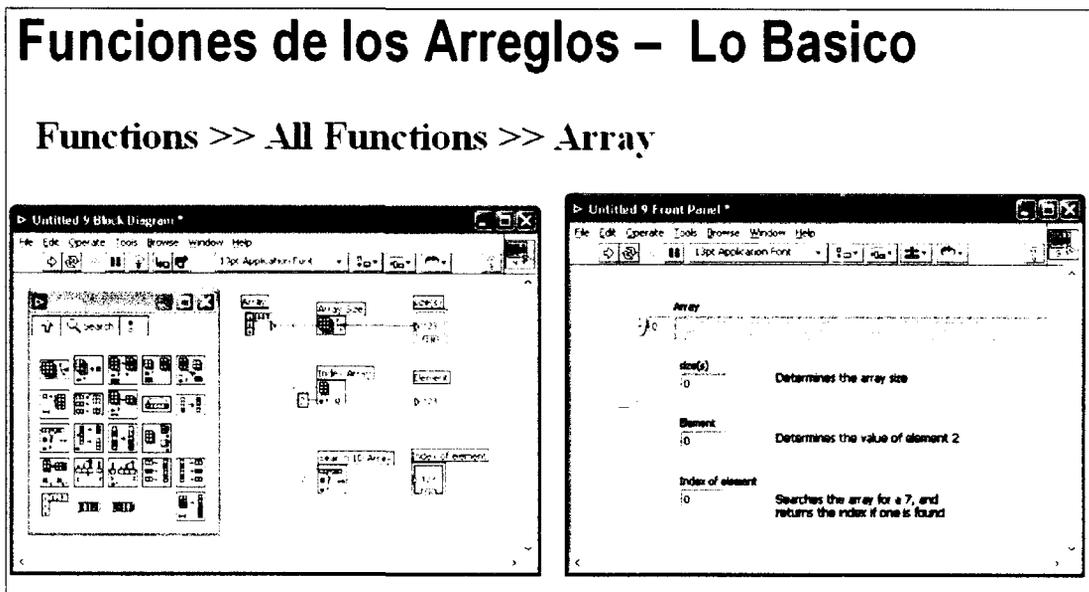


Figura 24. Funciones de los arreglos (NI, 2005).

2. CONSTRUCCIÓN DE UN ARREGLO.

Build Array (Construcción de Arreglos) puede realizar dos funciones distintas. Concatena múltiples arreglos o añade elementos a un arreglo de dimensiones al cambiar el tamaño de la función para incrementar el número de dimensiones del arreglo de salida. Para concatenar las entradas en un arreglo más largo de la misma dimensión se da click derecho en el nodo de la función y se selecciona **Concatenate Inputs** (Concatenar Entradas) desde el menú de atajo. La construcción de un arreglo se ilustra en la figura 25.

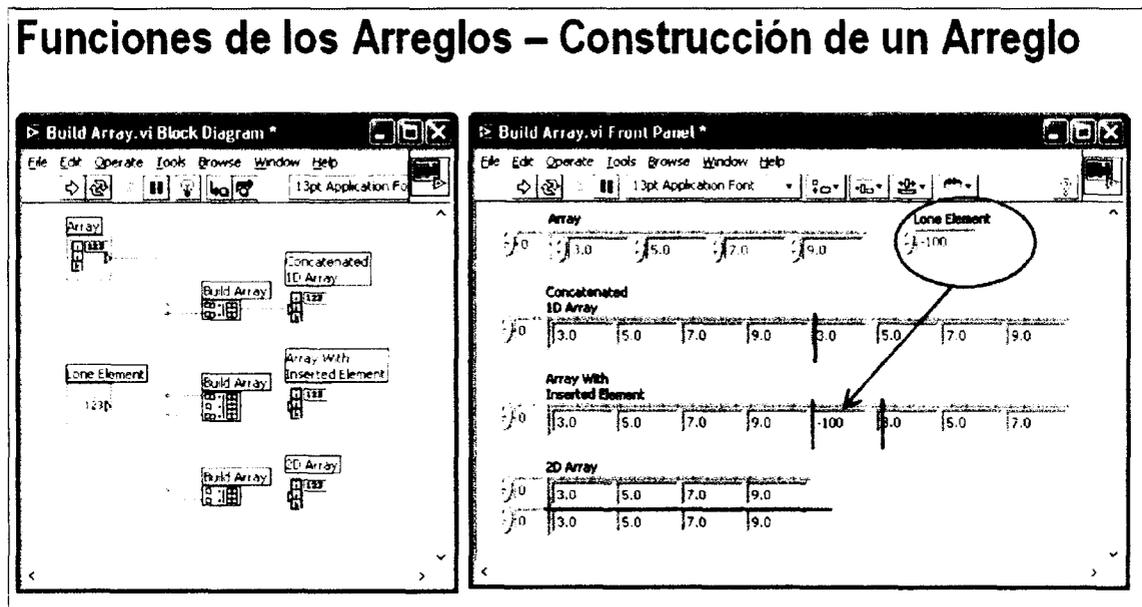


Figura 25. Construcción de un arreglo (NI, 2005).

3. GRÁFICOS.

IVs con gráficos usualmente recolectan los datos en un arreglo y después dibujan estos datos en una gráfica. Los gráficos situados en la paleta **Controls» All Controls» Graph** incluyen el gráfico de forma de onda y el gráfico XY. El diagrama del gráfico de forma de onda traza solamente funciones de una sola variable, como en $y = f(x)$, con puntos distribuidos uniformemente a lo largo del eje x, tal como formas de onda adquiridas con tiempo variable. Los gráficos expresos XY exhiben cualquier número de puntos, ya sea que estos sean muestreados uniformemente o no. Se cambia el tamaño de la leyenda de la gráfica para exhibir múltiples diagramas. Los diagramas múltiples se utilizan para ahorrar espacio en el panel frontal y para hacer comparaciones entre diagramas. Los gráficos XY y de forma de onda se adaptan automáticamente a los diagramas múltiples.

Gráfica de Forma de Onda de Trazo-Simple (Single-Plot Waveform Graph).

Los gráficos de forma de onda aceptan un solo arreglo de valores e interpretan los datos como puntos en el gráfico e incrementa el índice x por uno comenzando en $x = 0$. El gráfico también acepta un cluster de un valor inicial X, y de un arreglo de datos Y.

Gráfica de Forma de Onda de Trazo Múltiple

Los gráficos de forma de onda de trazo múltiple aceptan un arreglo bidimensional de valores, en donde cada fila del arreglo es una grafica sencilla. La gráfica interpreta los datos como puntos en la gráfica e incrementa el índice x por uno, comenzando en $x = 0$. Para ello se cablea un arreglo de datos bidimensionales a la gráfica, se hace clic derecho en la gráfica, y se selecciona **Transpose Array** (arreglo transpuesto) del menú de atajo para manejar cada columna del arreglo como un diagrama aparte.

Un gráfico de forma de onda de diagramas múltiples también acepta un cluster de un valor X , y de un arreglo bidimensional de datos Y . El gráfico interpreta los datos de Y como los puntos en el gráfico e incrementa el índice X por x , comenzando en $x = 0$.

Un gráfico de forma de onda de diagramas múltiples acepta un cluster de un valor inicial X , de un valor x , y de un arreglo que contenga clusters. Cada cluster contiene un arreglo de puntos que contiene los datos de Y . Se utiliza la función de Bundle (empaquetado) para empaquetar los arreglos en clusters, y se utiliza la función de Build Array (construir arreglo) para construir los clusters resultantes en un arreglo.

Single-Plot XY Graph (Gráfica XY de Trazo Simple)

Los gráficos XY de trazo simple aceptan un cluster que contenga un arreglo X y un arreglo Y . El gráfico de XY también acepta un arreglo de puntos, en donde un punto es un cluster que contiene un valor de X y un valor de Y .

MultiPlot XY Graph (Gráfica XY de diagramas múltiples)

La gráfica XY de diagramas múltiples acepta un arreglo de diagramas, en donde un diagrama es un cluster que contiene un arreglo X y un arreglo Y . La gráfica XY de diagramas múltiples también acepta un arreglo de clusters de diagramas, en donde una gráfica es un arreglo de puntos. Un punto es un cluster que contiene un valor X y un valor Y .

SECCIÓN VII

CADENAS DE CARACTERES, CLUSTERS Y MANEJO DE ERRORES.

1. CADENAS DE CARACTERES.

Una cadena es una secuencia de caracteres despleables o no despleables (ASCII). Las cadenas se usan frecuentemente para enviar comandos a instrumentos, para proveer información acerca de pruebas (tales como el nombre del operador y la fecha), o para desplegar resultados al usuario. Los controles e indicadores de cadena se encuentran en la subpaleta **Text Control** o **Text Indicator** de la paleta de **Controles**. Para introducir o cambiar texto se utiliza la herramienta de texto (Text Tool) y presionado con el ratón el control de cadena (String Control). Las cadenas pueden variar en su tamaño. Las cadenas de indicadores y controles pueden tener barras de movimiento (Scroll Bars) dando click con el botón derecho del ratón y seleccionando **Visible Items» Scrollbar**. La barra de movimiento no se activará si el Control o el Indicador no son lo suficientemente grandes.

2. CLUSTERS.

Los Clusters agrupan componentes iguales o desiguales juntos. Los Componentes de los Clusters pueden ser de diferentes tipos de datos. Ejemplos: Información de Error Agrupando una señal de error Booleano, un código de error numérico, y un cadena de origen de un error para especificar el error exacto.

Todos los elementos de un Cluster deben ser ya sea Indicadores o Controles. No se puede tener una Control de Cadena y un Indicador Booleano. Los Clusters se pueden considerar como un grupo de alambres individuales (datos) juntos en un cable (cluster).

Creación de un cluster.

En el panel frontal se elige **Cluster** desde la paleta **Controls » All Controls » Array & Cluster**. Esta opción brinda un formato (shell) parecido al formato obtenido al crear arreglos. Uno puede cambiarle el tamaño al formato una vez que se ha seleccionado dando click derecho adentro del formato para añadir objetos de cualquier tipo.

El cluster se convierte en un Indicador o Control basado en el primer objeto que fue ingresado dentro del Grupo. También se puede crear una constante de cluster en el diagrama de bloque escogiendo **Cluster Constant** de la paleta **Cluster**. Esto brinda un formato (shell) de cluster vacío. Se puede dar cualquier tamaño al cluster una vez ingresado. La figura 26 ilustra la creación de un cluster.

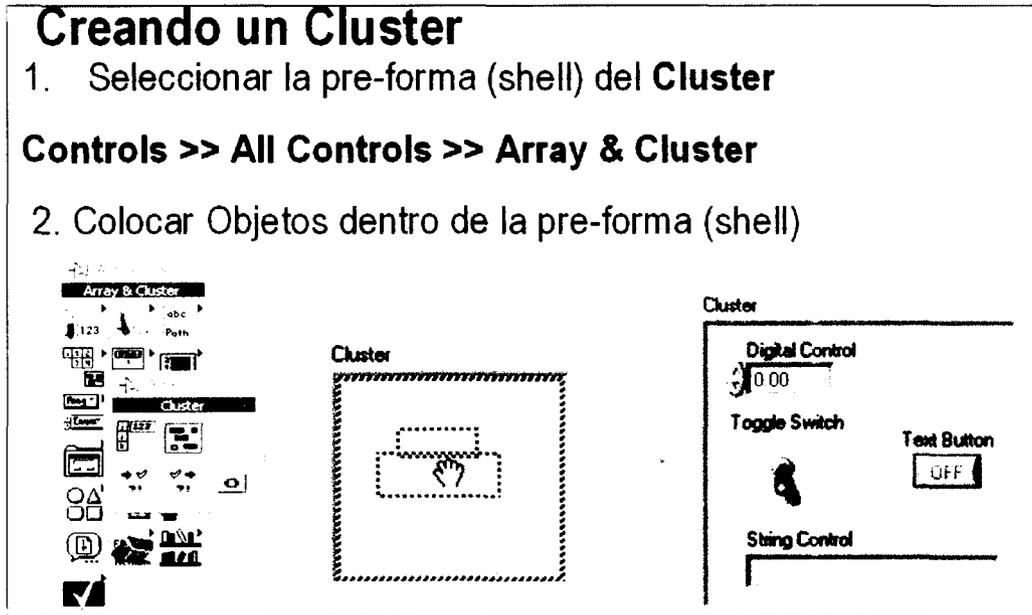


Figura 26. Creación de un cluster (NI, 2005).

Funciones del cluster.

Función de Bundle (agrupación). Forma un cluster conteniendo los objetos dados.

Función Bundle by Name (agrupa por nombre). Actualiza valores de objetos localizados en grupos específicos (los objetos deben tener su propia clasificación).

Función Unbundle (desagrupar). Se utiliza para acceder a todos los objetos del cluster.

Función Unbundle by Name (desagrupar por nombre). Se utiliza para acceder objetos específicos (uno o más) en el cluster.

La función **Unbundle** (desagrupar) debe tener exactamente el mismo número de terminales como se tienen elementos en el cluster. Añadiendo o Removiendo elementos en el cluster rompe cables en el diagrama.

También se pueden obtener las funciones de **Bundle** (agrupar), **Unbundle** (desagrupar), **Bundle by Name** (agrupar por nombre), y **Unbundle by Name** (Desagrupar por Nombre) al dar click derecho con el ratón en la terminal del cluster en el diagrama de bloques y eligiendo **Cluster Tools** (herramientas de cluster) del Menú. Cuando se escoge **Cluster Tools**, las funciones **Bundle** (agrupar) y **Unbundle** (desagrupar) automáticamente contienen el número correcto de terminales. Las funciones **Bundle by Name** (agrupar por nombre) y **Unbundle by Name** (desagrupar por nombre) aparecen con el primer elemento del Cluster.

Errores de cluster.

Los clusters para errores son un medio poderoso para manejar errores. Los IV de adquisición de datos (DAQ IVs) las funciones de manejo de entradas y salidas de archivo (File I/O), los IV de networking, y muchos otros VI utilizan este método para pasar información acerca de errores entre nodos. El cluster para errores contiene los siguientes elementos:

- **status**, Un Booleano al que se le asigna un valor verdadero si ocurre algún error.
- **code**, Un valor numérico al que se le asigna un número de código correspondiente al error que ha ocurrido.
- **source**, Una cadena de caracteres que identifica el VI en donde ocurrió el error.

3. TÉCNICA DE MUESTRA DE ERRORES.

Los clusters para errores son útiles para determinar la ejecución de un subIV cuando se encuentra un error. También los clusters para errores pueden ser útiles para determinar el flujo del programa debido al paradigma de programación del flujo de datos. Esto puede ser útil especialmente al configurar un muestreo en más de una tarjeta de adquisición de datos (DAQ board) simultáneamente. La función de **Unbundle by Name** (desagrupar por nombre) muestra los componentes de un cluster de error.

SECCIÓN VII. DOCUMENTOS E IMPRESIÓN.

1. IMPRESIÓN.

LabVIEW ofrece muchas opciones para imprimir los IVs. Desde la forma estándar **File » Print menu**, el usuario puede imprimir una copia de su IV, o puede generar una copia para guardarla en un archivo o publicarla.

Utilizando el IV Print Panel (Impresión de Panel) en LabVIEW permite al usuario imprimir de forma programada los resultados de una prueba. Los IVs también pueden ser configurados para imprimir automáticamente inmediatamente después de cada ejecución. Esta opción se encuentra en **VI Properties » Print Options**. Para aplicaciones más avanzadas, LabVIEW tiene herramientas que generan reportes que le permiten al usuario crear reportes personalizados para aplicación individuales.

LabVIEW 7.0 incluye un IV Express llamado Report. Este IV genera un reporte predefinido que contiene la documentación del IV, datos que el IV regresa y reportes de propiedades, tales como el autor, la compañía y el número de páginas.

2. DOCUMENTANDO VI's.

Al abrir **VI's properties** (propiedades del VI) un desarrollador puede añadir documentación a su IV. La documentación colocada en el **Description field** (espacio para la descripción) de la ventana de documentación del IV es mostrada en **Context Help** (ayuda en contexto), y se imprime con el IV. Si un usuario tiene una aplicación que esta siendo desarrollada continuamente, puede seguir los cambios en el desarrollo con **Revision History** (historial de revisiones), también encontrado en **VI Properties**. Cualquier control o indicador en el Panel Frontal puede ser documentado al hacer click derecho con el ratón y elegir **Description and Tip** (descripción y sugerencia). La información de descripción aparece en el menu **Context Help** (ayuda en contexto) cuando un usuario pasa el cursor sobre el objeto, y la información de sugerencia es mostrada en una pequeña ventana pegada al cursor cuando el usuario detiene el movimiento del cursor sobre el objeto.

Al igual que los comentarios en un lenguaje basado en texto, el desarrollador podría querer explicar una porción de su código, o proveer direcciones en el panel de frontal. Cualquiera de estas necesidades puede ser cumplida al usar la herramienta de etiquetado **Labeling Tool** para crear una caja de texto libre con tantas instrucciones o explicaciones como sean necesarias.

Centro de Información-Biblioteca



30002006724389