

*MANUAL DE PRÁCTICAS DEL
LABORATORIO DE ANÁLISIS
EXPERIMENTAL DE ESFUERZOS*

UNAM
FACULTAD DE INGENIERÍA
UNIDAD DE INVESTIGACIÓN Y
ASISTENCIA TÉCNICA EN
MATERIALES

*PROYECTO PAPIME
PE 102512
CD. UNIVERSITARIA
2016*



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

**UNIDAD DE INVESTIGACIÓN
Y ASISTENCIA TÉCNICA EN MATERIALES**

**MANUAL DE PRÁCTICAS DEL
LABORATORIO DE ANÁLISIS EXPERIMENTAL
DE ESFUERZOS**

Proyecto PAPIME PE 102512

Cd. Universitaria 2017

RAMOS TREJO, Efraín, V. H. Jacobo Armendáriz, A. Ortiz Prado, I. Cueva Guitrón, G. Álvarez Lozano. *Manual de prácticas del laboratorio de Análisis experimental de esfuerzos*. México, Universidad Nacional Autónoma de México, Facultad de Ingeniería, 2017, 76 p.

Manual de prácticas del laboratorio de Análisis experimental de esfuerzos

Primera edición: Febrero de 2017

D.R. © 2017, UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
Avenida Universidad 3000, Col. Universidad Nacional Autónoma de México
Ciudad Universitaria, Delegación Coyoacán, México, D.F. C.P. 04510

FACULTAD DE INGENIERÍA

<http://www.ingenieria.unam.mx/>

Prohibida la reproducción o transmisión total o parcial por cualquier medio sin la autorización escrita del titular de los derechos patrimoniales.

Hecho en México.

Corrección de estilo y cuidado de la edición:
Elvia Angélica Torres Rojas, Unidad de Apoyo Editorial

Autores

M. en I. Efraín Ramos Trejo

Dr. Víctor Hugo Jacobo Armendáriz

Dr. Armando Ortiz Prado

M. en I. Ignacio Cueva Güitrón

Biol. German Álvarez Lozano

Introducción

Mecánica de sólidos es una asignatura de ciencias de la ingeniería, obligatoria para las carreras de Ingeniería Mecánica, Mecatrónica e Industrial que se imparte en la Facultad de Ingeniería. En ella se analizan y modelan los efectos que se presentan en el interior de un cuerpo deformable por la interacción con las solicitaciones aplicadas. Estas cargas externas cambian la geometría del sólido generando esfuerzos y deformaciones.

En la asignatura se estudian los conceptos de fuerza axial, cortante, momento flexionante, cálculo de vigas, elementos sujetos a torsión, esfuerzos combinados y transformaciones de esfuerzos y deformaciones. En este sentido, la Mecánica de sólidos es una materia fundamental para establecer las bases de conceptos principalmente usados en diseño de elementos de máquinas. Si bien los conocimientos desarrollados son importantes, la enseñanza actual se limita a consideraciones teóricas y brinda soluciones de tipo analítico. Actualmente, no se cuenta con una parte experimental en donde el estudiante pueda reforzar los conceptos adquiridos en clase.

Las técnicas de análisis experimental de deformaciones y esfuerzos son métodos muy usados cuando se cuenta con modelos y estructuras que requieren evaluar *in situ*, o bien, cuando el modelo teórico resulta muy complejo dadas las condiciones de carga, geometría, propiedades, etcétera, de los elementos a estudiar. Cada una de estas técnicas proporciona información sobre el estado de esfuerzos ya que es una herramienta muy fiable.

Con esta premisa se pretende que los alumnos sean capaces de medir físicamente deformaciones para calcular esfuerzos mediante dos diferentes técnicas de análisis experimental, para este fin se requiere, además, de prototipos construidos o modelos que permitan establecer condiciones de trabajo que sean reproducibles en casos prácticos y que al ser comparados con los valores analíticos obtenidos de la teoría se observe la correlación a través de dichos métodos experimentales.

El objetivo de estas prácticas es estudiar diferentes tipos de instrumentación mecánica y las técnicas de medida asociadas a éstos. Asimismo, se pretende que el alumno tenga la capacidad de determinar cuál es el método más adecuado para su empleo en función de los requerimientos y los modelos a evaluar, en aspectos tales como la localización de los puntos de medida adecuados, adquisición de datos y la interpretación de los resultados obtenidos. Además, el estudiante deberá adquirir la habilidad de colocar los extensómetros a los especímenes que se someterán a condiciones de carga y de los cuales se analizarán los esfuerzos y deformaciones resultantes.

Contenido

Práctica 1. *Análisis experimental de esfuerzos, 1*

Práctica 2. *Extensometría eléctrica, 6*

Práctica 3. *Adquisición de datos, 12*

Práctica 4. *Tracción, 17*

Práctica 5. *Flexión en vigas, 24*

Práctica 6. *Torsión en barra de sección cilíndrica, 32*

Práctica 7. *Fotoelasticidad, 39*

Anexos

A. Guía de instalación de galgas extensométricas, *i*

B. Guía de programación en LabVIEW para *strain gage*, *x*

Práctica 1

Análisis experimental de esfuerzos

1.1 Objetivos

- Familiarizar al alumno con las técnicas empleadas en el análisis experimental de esfuerzos para el estudio y diseño de elementos estructurales y mecánicos.
- Al término del curso, el alumno será capaz de aplicar el análisis experimental de esfuerzos a elementos estructurales o elementos mecánicos mediante la elaboración de diferentes prototipos.

1.2 Introducción

El adecuado diseño de ejes, recipientes a presión, soportes estructurales, mecanismos, elementos mecánicos, etcétera, demanda determinar la distribución de fuerzas y esfuerzos que actúan sobre ellos y los valores permisibles de los mismos de acuerdo con su funcionalidad para evitar que fallen. La resistencia de los materiales proporciona la base teórica necesaria para predecir las características básicas de todo diseño mecánico, permitiendo comprender el comportamiento de estos elementos sometidos a cargas al considerarlos como cuerpos deformables. Sin embargo, en el caso de geometrías o suposición de cargas complejas, puede ocurrir que el análisis teórico no sea suficiente y que sea necesario aplicar medidas de carácter experimental para poder completar el diseño o el análisis.

Tradicionalmente, los métodos experimentales de esfuerzos han permitido evaluar la distribución de tensiones en sólidos elásticos sometidos a sollicitaciones externas arbitrarias; si bien, en la actualidad, el empleo de análisis por elemento finito permite dar solución a este tipo de problemas, éste se centra básicamente en estructuras donde deben definirse las características geométricas del diseño; además, es importante también analizar estructuras idealizadas al considerar inconvenientes de manufactura, ensamble, factores externos como condiciones climáticas, etc.

1.3 Fundamentos

Los métodos experimentales siguen siendo un parámetro que permite validar resultados sobre todo cuando se tienen estructuras ya existentes o algún prototipo desarrollado.

Para el análisis, se asumen hipótesis que facilitan su cálculo, éstas son:

- ❖ Los materiales se consideran continuos.
- ❖ Homogéneo. Propiedades idénticas en todos los puntos.
- ❖ Isótropos. Propiedades idénticas en todas direcciones.
- ❖ Las cargas interiores que preceden a las cargas son nulas.
- ❖ Es válido el principio de superposición de efectos, en virtud de que las deformaciones de los cuerpos son mínimas en comparación a las dimensiones que tiene el objeto de análisis.
- ❖ Es aplicable el principio de Saint Venant. Las fuerzas interiores en los puntos de un sólido, situados lejos de los lugares de aplicación de la carga no dependen del modo de aplicación de las mismas. Por lo que se puede sustituir un sistema de fuerzas por otro equivalente.
- ❖ Las cargas son cuasi-estáticas –no varían con el tiempo.

Con estas premisas, el análisis completo de esfuerzos en un cuerpo requiere de evaluar seis incógnitas en cada una de sus partículas diferenciales, por ejemplo, tres esfuerzos normales y tres esfuerzos cortantes; además, para optimizarlo es necesario modificar varias veces el modelo en cuanto a geometría y otros parámetros, lo que origina nuevas evaluaciones de esfuerzos en todos los puntos del cuerpo a fin de hacer comparaciones entre modelos; ello es prácticamente imposible de realizar, pues aun para condiciones de frontera estáticas, no es sencillo resolver muchos problemas con materiales lineales, homogéneos e isótropos.

Es aquí cuando el análisis experimental de esfuerzos (AEE) ayuda a resolver y a cuantificar los efectos de cargas en un cuerpo o elemento estructural, para este fin se emplean dos tipos de técnicas denominadas:

- a) Campo completo (figura 1.1)
 - Lacas frágiles (barnices agrietables)
 - Método de Moiré
 - Métodos fotoelásticos
- b) Técnicas puntuales (figura 1.2)
 - Extensometría eléctrica

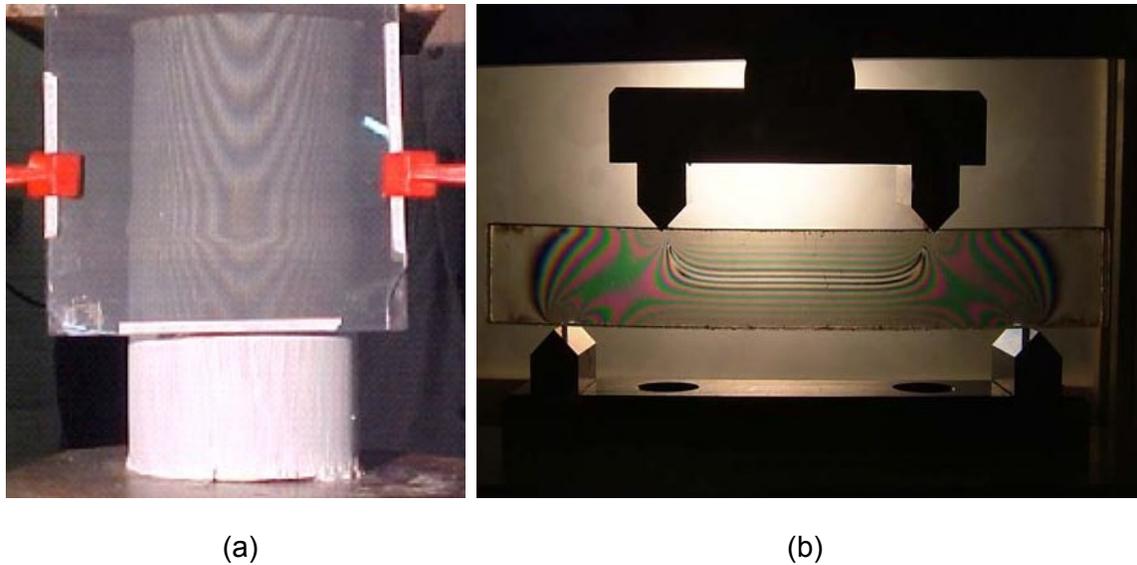


FIGURA 1.1 Técnicas de campo completo (a) Método de Moiré, (b) Método fotoelástico

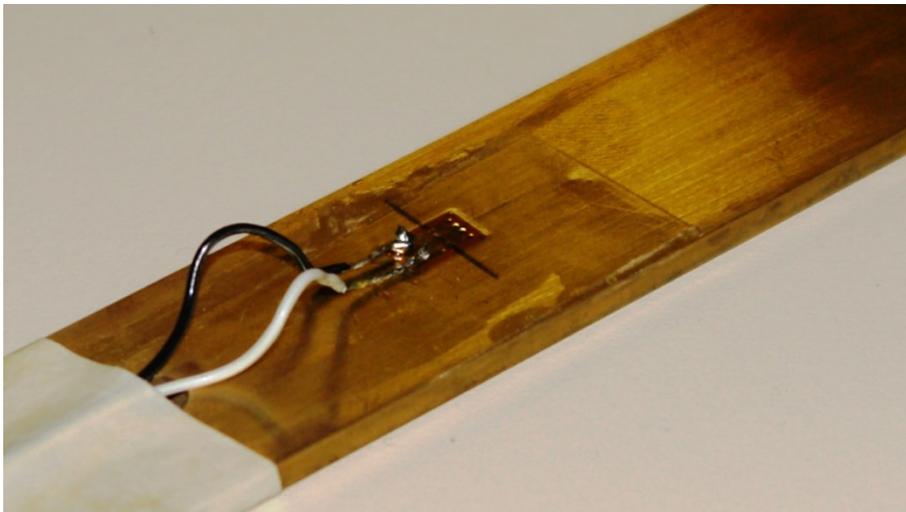


FIGURA 1.2 Técnica puntual, extensometría eléctrica

La aplicación de la respectiva técnica dependerá del problema específico y la complejidad geométrica. Sin embargo, es muy común complementar ambas metodologías. Por un lado, las técnicas puntuales tienen un grado de precisión mayor, pues evalúan el estado de esfuerzos en zonas específicas localizadas, en tanto, las denominadas de campo completo se caracterizan por determinar el estado general de deformaciones de un cuerpo o modelo. Resulta, pues, común evaluar un problema mediante la técnica de campo completo con la finalidad de determinar el estado general de esfuerzos y, posteriormente, evaluar los puntos que requieren de un mayor grado de precisión o donde se considere que se encuentran las mayores demandas de carga.

Excepto en los casos en donde hay esfuerzos de contacto implicados, el esfuerzo σ se calcula dividiendo la sollicitación externa entre el área de contacto, no es posible medir directamente los esfuerzos. Por ello, las mediciones experimentales se basan realmente en la medición de las deformaciones que sufre el cuerpo y que, posteriormente, se transforman en esfuerzos mediante las ecuaciones constitutivas. Esto es cierto siempre que se considere el tipo de comportamiento que presente un sólido deformable del cual se conoce su ecuación constitutiva, normalmente se tratará de un:

- Sólido elástico lineal, homogéneo e isotrópico (SEHLI), o en su defecto de
- Sólido elástico lineal, homogéneo, transversalmente isotrópico (SEHLTI), o de un
- Sólido elástico lineal, homogéneo, ortotrópico (SEHLO)

Para los casos en que se puedan evaluar experimentalmente los esfuerzos, se utilizan transductores que son elementos que reciben algún tipo de energía, dentro de las que pueden estar las mecánicas y térmicas, y entregan otro tipo de energía, como puede ser eléctrica. En los casos en que la señal es muy débil, se busca amplificarla con el mismo transductor para así tener una señal de una amplitud media.

Cuando ya se tiene un modelo o una estructura y no es posible encontrar un esfuerzo puntual, es necesario apoyarse de los análisis experimentales. Se utilizan principalmente las técnicas de:

Extensometría eléctrica. Esta técnica utiliza un dispositivo cuyo principio de operación se basa en el cambio de resistencia que se genera por efectos de diversas magnitudes mecánicas, como pueden ser la presión, carga, torque, deformación, posición etc. A tal dispositivo se le conoce como galga extensométrica o *Strain gage* (en inglés). Mediante conversiones matemáticas, o mediante el uso de un software, los cambios de resistencia son transformados a valores de deformaciones que sufre un elemento y que, posteriormente, son transformados a esfuerzos. La ventaja de esta técnica es que las galgas extensométricas permiten realizar mediciones directamente sobre la superficie de una muestra.

Es de suma importancia que el extensómetro sea colocado apropiadamente sobre la pieza para que las deformaciones sean transferidas de manera adecuada desde el espécimen analizado a través del adhesivo y al material de respaldo que censa la deformación.

Fotoelasticidad. Este método permite una evaluación cualitativa de la distribución de esfuerzos por el fenómeno de refracción de luz, se presenta a través de la observación de franjas claras y oscuras para una fuente de luz monocromática o franjas isocromáticas que se generan en modelos de polímero transparente con forma similar a la estructura que se desea analizar. Estos modelos se deben colocar entre placas polarizadoras junto con una fuente de iluminación, de manera que al ser sometidos a condiciones de carga similares al del elemento en estudio, se pueden visualizar dichas franjas. A diferencia de los métodos puntuales, con éste se puede obtener la información distribuida a lo largo de toda un área.

1.4 Actividades

Se llevará a cabo la exposición del equipo que se utilizará para las diferentes técnicas de análisis experimental, ejemplificando los campos de aplicación y el tipo de análisis que se realiza. Se mostrará el software de programación para la adquisición de señales y su transducción (LabVIEW). Se expondrán los equipos de adquisición de datos para familiarizar al alumno en cuanto a las capacidades, conexiones, cuidados y manejo apropiado de los sistemas de prueba (chasis cRIO); asimismo, se identificarán los accesorios de carga y kits de instrumentación que se utilizarán en el laboratorio para implementar cada una de las prácticas.

1.5 Cuestionario previo

- ¿Qué es el análisis experimental de esfuerzos?
- ¿Qué métodos de análisis experimental de esfuerzos existen?
- ¿Cuál es la importancia de los métodos experimentales de esfuerzo?
- Deducir la ecuación de la deformación a partir del desplazamiento de dos puntos de un elemento sometido a carga axial.
- ¿El desplazamiento de dos puntos o la deformación de un sólido implica que esté sometido a un estado de esfuerzos? Explicar.
- Mencionar qué es un puente de Wheatstone y para qué se utiliza.

1.6 Referencias

- Sciammarella, Cesar A., Sciamarella, Federico M. *Experimental Mechanics of Solids*, John Wiley & Sons, United Kingdom, 2012.
- Doyle, James F., *Modern Experimental Stress Analysis*, John Wiley & Sons. England, 2004.
- Dally James J.W., Riley W.F., *Experimental Stress Analysis*, McGraw-Hill, USA, 1991.
- Srinivas J., *Stress Analysis and Experimental Techniques: An Introduction*, Alpha Science, USA, 2011.

Práctica 2

Extensometría eléctrica

2.1 Objetivos

- Introducir al alumno al principio básico de operación de una galga extensométrica (Strain gage).
- Aplicar la técnica de extensometría eléctrica.

2.2 Introducción

La extensometría es una técnica experimental para la medición de esfuerzos y deformaciones que se basa en el cambio de la resistencia eléctrica de un material sometido a diferentes condiciones de carga. Este material, por sí mismo, sería incapaz de medir la deformación que pudiera experimentar un espécimen. Para lograr este objetivo, la extensometría eléctrica emplea dispositivos conocidos como galgas extensométricas (figura 2.1), las cuales al ser firmemente adheridas a la superficie del cuerpo a evaluar permiten realizar mediciones directamente sobre la superficie del elemento. Estos dispositivos son los más ampliamente utilizados para la medición de la deformación y, en casos más generales, como transductores para medir cantidades físicas como fuerza, par, presión y aceleración.

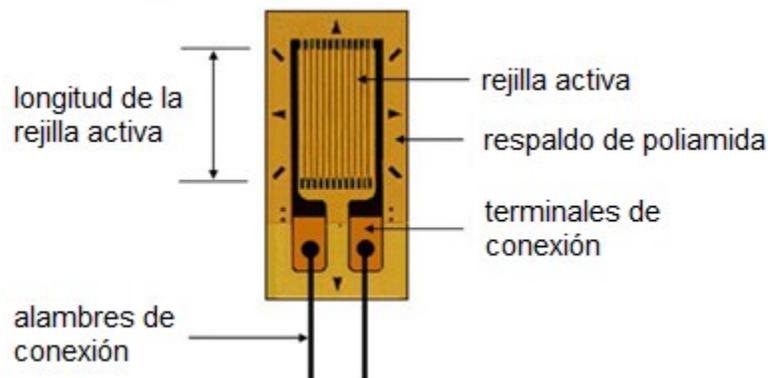


FIGURA 2.1 Galga extensométrica

2.3 Fundamentos

El extensómetro, como también se le conoce, al encontrarse adherido a la superficie de un cuerpo sometido a una carga, genera que éste se deforme y produzca una variación en su resistencia eléctrica. Los materiales que suelen utilizarse para fabricar la rejilla activa de estos dispositivos son aleaciones metálicas como, por ejemplo, constantán, nicromel o elementos semiconductores como silicio y germanio. La resistencia R del conductor con longitud L , área de sección transversal A y una resistencia específica ρ se da por la siguiente relación:

$$R = \rho \frac{L}{A} \quad (2.1)$$

En donde R = Resistencia eléctrica del material [ohm]

L = Longitud [m]

A = Área seccional del conductor [m²]

ρ = Resistividad [ohm*m/m²]

La sensibilidad S_A de la aleación metálica utilizada como conductor se define como el cambio de resistencia por unidad de resistencia inicial dividida por la deformación aplicada.

$$S_A = \frac{dR/R}{\varepsilon} = 1 + 2\nu + \frac{d\rho/\rho}{\varepsilon} \quad (2.2)$$

La ecuación anterior muestra que la sensibilidad a la deformación de cualquier aleación es debida a dos factores:

1. El cambio en las dimensiones del conductor (representado por el término $1 + 2\nu$).
2. El cambio en la resistencia específica (representado por el término $\frac{d\rho/\rho}{\varepsilon}$).

Para lograr medir el cambio en la resistencia con exactitud se requiere de la detección de la variación de ésta en rangos muy pequeños (fracciones de ohm), los cuales se describen ya en función de la deformación como milideformaciones (milistrain); por lo tanto, para medir tales cambios se requiere de una alta precisión, razón por la que se emplea un puente de Wheatstone. Este montaje eléctrico consiste en cuatro resistencias equilibradas, esto significa que la diferencia de potencial entre los puntos A y B es nula (figura 2.2), en estas condiciones no existe paso de corriente por ninguna resistencia.

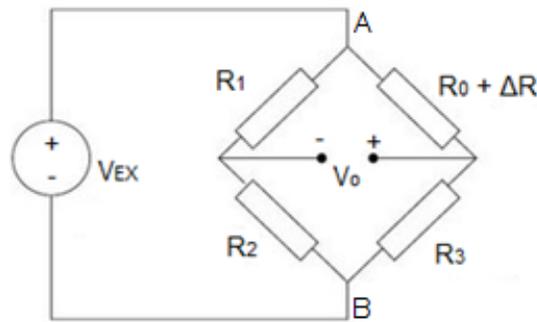


FIGURA 2.2 Puente de Wheatstone para la conexión de una galga extensométrica

En el arreglo anterior al existir un desequilibrio por parte de la rama activa (extensómetro), pasa de un valor R_0 a un $R_0 + \Delta R$, permitiendo medir el valor de la deformación mediante un transductor.

En general, se tiene que el estado de esfuerzos en la superficie se encuentra sometido a un estado de tensiones bidimensionales, en este caso las galgas extensométricas permiten medir $(\sigma_x, \sigma_y, \sigma_{xy})$. Utilizando un arreglo de dos o cuatro galgas se puede configurar el puente de *Wheatstone* para que permita medir la deformación, en estos casos se recurre a configuraciones especiales de extensómetros denominados roseta.

Para estados biaxiales de esfuerzos (muy común en el uso de strain gage), una roseta de dos o tres elementos puede ser requerida para determinar los principales esfuerzos. Cuando las direcciones de los esfuerzos se conocen de antemano, una roseta de dos elementos a 90° , por ejemplo, puede ser empleada con las direcciones de los ejes alineadas con los esfuerzos.

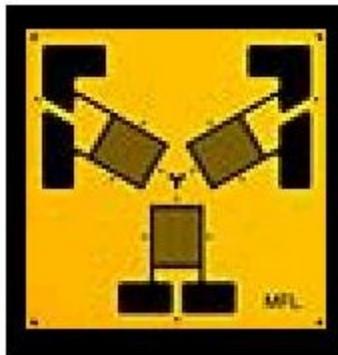


FIGURA 2.3 Disposición de un extensómetro tipo roseta

Los modos en los que se pueden configurar las conexiones de las galgas a un puente de Wheatstone permiten hacer la configuración necesaria para determinar el estado de esfuerzos en particular:

- Cuarto de puente tipo I
- Cuarto de puente tipo II
- Medio puente tipo I
- Medio puente tipo II
- Puente completo tipo I
- Puente completo tipo II
- Puente completo tipo III

2.4 Criterios de selección de una galga extensométrica

Las consideraciones necesarias para la selección de un extensómetro depende básicamente de las condiciones en las que va a ser empleado: si se trata de condiciones estáticas o dinámicas saber en qué condiciones de temperatura se desempeñarán, o qué tipo de solicitaciones de soportarán; asimismo, la duración de las pruebas a las que se someterán, ya sean por unos segundos o incluso varios años.

Tratar de conciliar todas las variables no resulta una tarea trivial, se puede lograr una selección adecuada para una aplicación dada si se consideran los siguientes puntos:

1. Aleación de la rejilla activa de una galga extensométrica (sensibilidad de la aleación)
2. Material de respaldo
3. Longitud de la rejilla activa
4. Tipo de galga (unidireccional o roseta)
5. Resistencia de la rejilla activa
6. Número de auto-compensación de temperatura [STC]
7. Opciones

Básicamente, el proceso de selección consiste en una combinación particular de características disponibles que cumplan con las condiciones de trabajo del elemento que se va a instrumentar.

En general, el sistema de designación de una galga extensométrica la proporciona el fabricante. La elección se realiza de acuerdo con su aplicación y se da por la siguiente nomenclatura:

$$\frac{E \ A \ 06 \ 250 \ BG \ 120 \ Opción - LE}{1 \ 2 \ 3 \ 4 \ 5 \ 6 \ 7}$$

- 1) Indica el tipo de material de la matriz portadora
- 2) Tipo de aleación de la rejilla activa
- 3) Autocompensación por efecto de variación de temperatura
- 4) Longitud de la rejilla activa en milésimas de pulgada
- 5) Geometría de la rejilla
- 6) Resistencia de la rejilla activa en ohms
- 7) Variaciones constructivas u opciones

Un dato adicional que debe proporcionar el fabricante junto con la designación de una galga extensométrica es el factor de la galga (GF por sus siglas en inglés).

Posteriormente, se debe definir el tipo de adhesivo a usar, éste deberá transmitir fielmente la deformación de la pieza a la galga, manteniendo esa unidad durante el periodo de servicio.

2.5 Actividades

En función del elemento por instrumentar se deberá seleccionar el tipo adecuado de galga que se va a usar.

Posteriormente, se procederá a instrumentar un elemento metálico (solera) con un extensómetro (galga) de práctica o falsa (dummy), siguiendo el procedimiento establecido en la guía de preparación superficial y pegado de una galga extensométrica, (Anexo 1).

2.6 Material

- Solera de aluminio
- Galgas extensométricas
- Kit para limpieza y preparación superficial
- Kit de adhesivo M-Bond 200
- Accesorios para soldadura blanda
- Alambre esmaltado y cable trifilar
- Lijas de carburo de silicio
- Guía para la preparación y pegado de una galga extensométrica

2.7 Resultados esperados

- Conocer y dominar la técnica para la instrumentación con galgas extensométricas.
- Determinar para una viga en voladizo (cantiléver), ¿qué arreglos de puente de Wheatstone son necesarios?
- Determinar los factores que pueden generar datos o lecturas falsas.

- Evaluar y determinar la(s) razón(es) en que la temperatura influye en las lecturas obtenidas.

2.8 Propuesta de trabajos

- Para cada tipo de arreglo del puente de Wheatstone, describir y mencionar en qué casos se aplican.
- Para una barra redonda instrumentada y ensayada a torsión, describir cuáles son los arreglos del puente de Wheatstone que se pueden emplear.
- Colocación de extensómetros en una barra de acero y una de latón. Realizar un análisis de la metodología y los materiales utilizados.
- Determinar los esfuerzos normales y cortante a partir de los datos generados con una roseta

2.9 Cuestionario previo

¿Explique las bases físicas de la extensometría eléctrica?

¿Qué información se puede obtener al instrumentar un elemento mecánico mediante extensometría eléctrica?

¿Qué es una galga extensométrica?, ¿De qué materiales es fabricada?, ¿De qué factores depende su selección?

2.10 Referencias

- Freddi Alessandro, Olmi Giorgio, Cristofolini Luca, *Experimental Stress Analysis for Materials and Structures: Stress Analysis Models for Developing Design Methodologies*. Springer Series Solids and Structural Mechanics, Springer, Germany, 2015.
- Sciammarella, Cesar A., Sciamarella, Federico M., *Experimental Mechanics of Solids*, John Wiley & Sons, United Kingdom, 2012.
- Doyle, James F., *Modern Experimental Stress Analysis*, John Wiley & Sons. England, 2004.
- Dally James J.W., Riley W.F., *Experimental Stress Analysis*, McGraw-Hill, USA, 1991.
- Srinivas J., *Stress Analysis and experimental techniques: An Introduction*, Alpha Science, USA, 2011.

Práctica 3

Adquisición de datos

3.1 Objetivos

- Conocer las diferentes etapas que involucra el proceso de adquisición de datos de señales físicas.
- Elaborar un programa en LabVIEW que permita almacenar y registrar datos en un archivo.

3.2 Introducción

La adquisición de datos o adquisición de señales consiste en la toma de muestras del mundo real (señal continua-sistema analógico) para generar datos que puedan ser manipulados por un ordenador u otros sistemas electrónicos (sistema digital). Es decir, se toma un conjunto de señales físicas, se convierten en señales eléctricas y se digitalizan de manera que se puedan procesar en una computadora (figura 3.1). Se requiere una etapa de acondicionamiento, que adecua la señal a niveles compatibles con el elemento que hace la transformación a señal digital. El elemento que hace dicha transformación es el módulo de digitalización o tarjeta de adquisición de datos (DAQ).

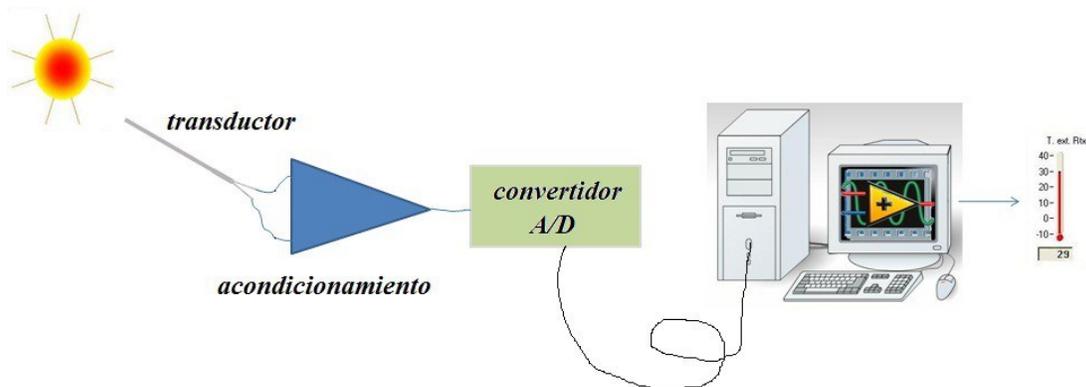


FIGURA 3.1 Proceso de adquisición de datos

Los datos (adquiridos) se visualizan, analizan y almacenan en una computadora, ya sea utilizando programas y lenguajes de programación que se configuran para las aplicaciones que los requieran. Un ejemplo de los lenguajes especializados de

programación utilizados en la construcción de grandes sistemas de adquisición de datos es LabVIEW® (Laboratory Virtual Engineering Workbench), que ofrece un entorno gráfico de programación optimizado para la adquisición de datos, enfocado a la programación virtual por lo que cuenta con numerosas herramientas de presentación como controles, botones indicadores etc., además de librerías especializadas para manejo de DAQ.

3.3 Fundamentos

La adquisición de datos se inicia con el fenómeno físico o propiedad física de un objeto (de investigación) que se desea medir por medio de un sensor. El sensor es un dispositivo que convierte una propiedad física o fenómeno a una señal eléctrica medible. La capacidad de un sistema de adquisición de datos para medir los distintos fenómenos depende de los sensores para convertir las señales de los fenómenos físicos mensurables en la adquisición de datos por hardware.

Las señales pueden ser digitales o analógicas según sea el transductor utilizado. Para ello, el acondicionamiento de señales suele ser necesario si la señal desde el transductor no es adecuado para la tarjeta DAQ que se utiliza. Esta etapa de acondicionamiento incluye los siguientes pasos:

- Amplificación
- Aislamiento
- Multiplexado
- Filtrado
- Excitación
- Linealización

3.4 LabVIEW

El sistema de adquisición de datos LabVIEW consiste en un lenguaje de programación gráfico que emplea íconos en lugar de líneas de texto para crear aplicaciones de una forma rápida y sencilla utilizando programación de flujo de datos, donde dicho flujo determina la ejecución del programa.

Los programas de LabVIEW son llamados instrumentos virtuales (Vis) debido a que su apariencia y operación se asemeja a instrumentos físicos como el osciloscopio y el multímetro. Dichos programas contienen la herramienta necesaria para adquirir, analizar, desplegar y almacenar datos, así como la herramienta que ayuda a solucionar un problema dentro del código fuente o diagrama de bloques.

Mediante estos programas se puede construir una interfaz de usuario con un juego de herramientas y objetos que contienen controles e indicadores como botones, perillas y otros dispositivos de entrada. Los indicadores pueden ser gráficas, LEDs e indicadores numéricos. Esta interfaz de usuario se conoce como panel frontal (figura 3.2).

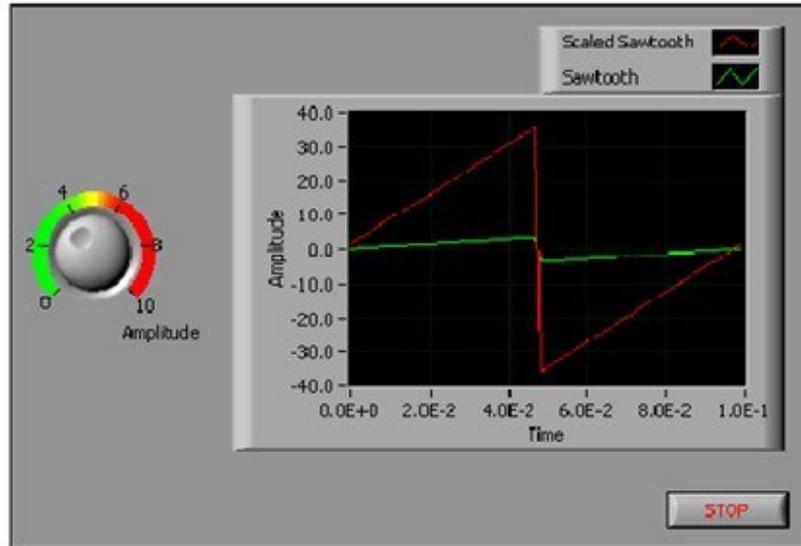


FIGURA 3.2 Panel frontal de un VI en LabVIEW

Asimismo, se pueden añadir códigos usando representaciones gráficas de funciones para controlar los objetos del panel frontal. El diagrama de bloques contiene dicho código y en algunas configuraciones generalmente se asemeja a un diagrama de flujo (figura 3.3).

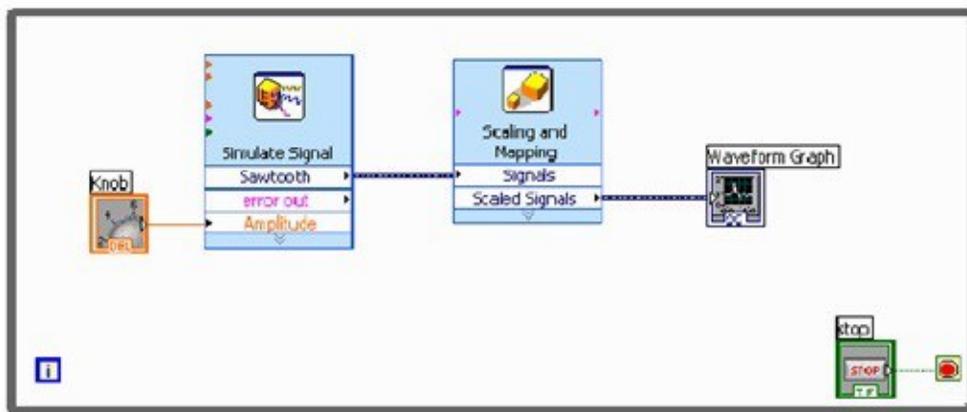


FIGURA 3.3 Diagrama de bloques correspondiente al panel frontal de la figura 3.2

Para colocar funciones en el diagrama de bloques y terminales en el panel frontal, se tienen las paletas o menús flotantes, llamadas paleta de controles y paleta de funciones, respectivamente, (véase la figura 3.4).

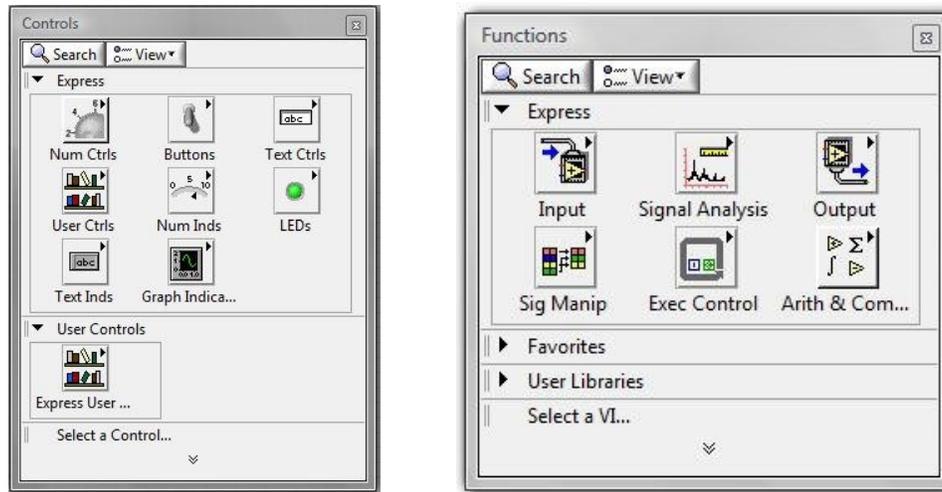


FIGURA 3.4 Paleta de controles y paleta de funciones, respectivamente

El lenguaje de programación que utiliza LabVIEW es llamado lenguaje G, el cual, a diferencia de los lenguajes que se basan en una sucesión de operaciones, está estructurado en el flujo de datos (*dataflow*), por lo que una función se ejecutará sólo hasta que tenga disponibles todos los datos de entrada que necesita.

3.5 Actividades

En este apartado se mostrará cómo construir una aplicación mediante el empleo del entorno de programación que proporciona LabVIEW.

El alumno tendrá que elaborar un programa para la adquisición y almacenamiento de datos, que le permita familiarizarse con el ambiente de programación; además, se harán las conexiones correspondientes de un elemento instrumentado para verificar la correcta adquisición de señales.

3.6 Material

- Como sensor se utilizan las galgas extensométricas montadas en la solera instrumentada en la práctica anterior
- Chasis cRIO y elementos de conexión
- Tarjeta de adquisición de datos (DAQ) de National Instruments
- Equipo de cómputo portátil
- Software de programación (LabVIEW)
- Guía para programación en LabVIEW

3.7 Procedimiento

- Mostrar el sistema de adquisición de datos para familiarizar al alumno con el ambiente de programación.
- Siguiendo los pasos de la guía de programación en LabVIEW que se encuentra en el Anexo 2, elaborar un programa para la adquisición y almacenamiento de datos para un canal y, posteriormente, hacerlo para más canales.
- Realizar las conexiones pertinentes entre el chasis cRIO y las galgas extensométricas instrumentadas para verificar las condiciones de operación y parámetros de funcionamiento.

3.8 Resultados esperados

- Programa elaborado de adquisición y almacenamiento de datos para galgas extensométricas.

3.9 Propuesta de trabajos

- Describir cada uno los pasos que componen un proceso de adquisición de datos.

3.10 Referencias

- Lajara, José R. Pelegrí, José. *LabVIEW Entorno grafico de programación*, Alfaomega, Barcelona, 2007.
- <http://www.ni.com/labview/technical-resources/> , Abril 2012.

Práctica 4

Tracción

4.1 Objetivos

- Determinar experimentalmente el comportamiento y propiedades mecánicas de diferentes materiales mediante un ensayo de tracción.
- Comparar las curvas de esfuerzo-deformación obtenidas a partir de la galgas extensométricas contra las arrojadas por la máquina universal de pruebas.

4.2 Introducción

El propósito de la mecánica de sólidos es analizar a los cuerpos como deformables, predecir dichas deformaciones y determinar si los materiales, geometrías y dimensiones permiten soportar las solicitaciones aplicadas o, de otra forma, optimar el desempeño de estos elementos. Por tal motivo, los problemas se engloban en dos tipos:

- a) Dimensionamiento. Cuando se busca seleccionar el material, las formas y dimensiones más adecuadas de una pieza, de manera que ésta pueda trabajar con seguridad, en buen estado y con costos adecuados.
- b) Verificación. Cuando una pieza tiene el material, las formas y dimensiones, y es necesario conocer si éstas son las adecuadas para resistir el estado de solicitaciones actuantes.

Una forma de evaluar las características mecánicas de un material consiste en aplicar fuerzas en sus extremos dirigidas éstas a lo largo de su eje longitudinal, de tal forma que el elemento se someta a tracción o compresión uniaxial. El ensayo de tracción es probablemente la prueba mecánica más utilizada para determinar la resistencia y el comportamiento mecánico de los metales, ya que se trata de una prueba simple, rápida y económica.

Como se mencionó en líneas anteriores, estas pruebas son sencillas y han sido totalmente estandarizadas por diversas instancias, donde destaca la American Society of Testing Materials, la cual a través de la Norma ASTM E8/E8M-15^a (Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials) describe las condiciones con las cuales

debe de llevarse a efecto el ensayo, el cual consiste en someter a una probeta (cilíndrica o rectangular) a cargas axiales y graduales de tracción. Lo anterior mediante el desplazamiento, a velocidad constante, del cabezal o actuador de la máquina (figura 4.2).

4.3 Fundamentos

Como ya ha sido mencionado, en el ensayo de tracción se deforma una probeta estandarizada hasta su ruptura por efecto de una carga axial que aumenta gradualmente, esta sollicitación evidentemente produce un alargamiento (deformación) a lo largo del eje de carga; sin embargo, la probeta no solamente se deforma en la dirección del esfuerzo, sino que también exhibe deformación en dirección perpendicular. La relación entre la deformación transversal respecto a la longitudinal se le conoce como módulo o coeficiente de Poisson ν .

$$\nu = \frac{\varepsilon_t}{\varepsilon_\ell} \quad (4.1)$$

donde ε_t es la deformación transversal y ε_ℓ es la deformación longitudinal. Generalmente, la sección de la probeta es circular (cilíndricas), pero también se utilizan probetas de sección rectangular (planas). Definiendo el área de sección de la probeta se pueden calcular los esfuerzos mediante la siguiente relación:

$$\sigma = \frac{P}{A_0} \quad (4.2)$$

Donde, P es la carga instantánea aplicada a la probeta y A_0 es el área de la sección original de la probeta. Las deformaciones transversal y longitudinal se pueden medir a través de galgas extensométricas orientadas, respectivamente, en cada dirección. A partir de la definición de deformación, la cual involucra el desplazamiento entre dos puntos de un cuerpo que es deformado, se puede obtener la deformación longitudinal de la probeta:

$$\varepsilon = \frac{\ell - \ell_0}{\ell_0} = \frac{\Delta\ell}{\ell_0} \quad (4.3)$$

$\Delta\ell$ representa el desplazamiento instantáneo inducido por la carga y ℓ es la distancia inicial entre dos puntos marcados en la probeta.

La relación entre esfuerzos normales vs. deformaciones unitarias para el caso del acero de bajo carbono presenta una forma peculiar, de acuerdo con el gráfico de la figura 4.1. En esta gráfica esfuerzo-deformación se pueden cuantificar las propiedades que tiene el material como:

- a) *Zona elástica*. Zona donde las deformaciones no son permanentes.
- b) *Zona plástica*. Zona donde las deformaciones son permanentes.

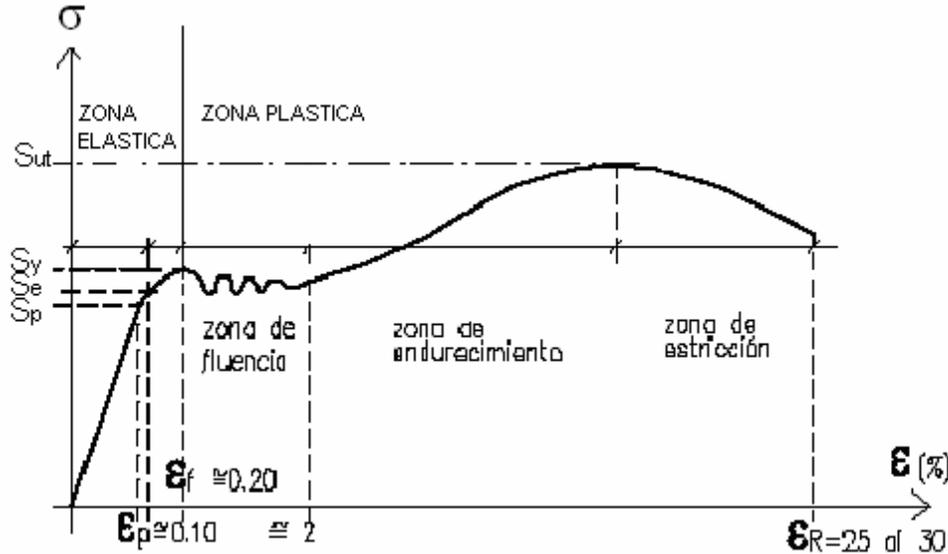


FIGURA 4.1 Diagrama esfuerzo deformación

c) Módulo de elasticidad (E). Conocido también como módulo de Young, corresponde a la pendiente de la curva $\sigma - \varepsilon$, en la región elástica, su planteamiento se basa en la ley de Hooke:

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon} \quad (4.4)$$

d) *Límite de proporcionalidad* σ_p . Esfuerzo máximo donde deja de existir una relación lineal entre los esfuerzos y las deformaciones (corresponde a la parte recta de la gráfica).

e) Límite de fluencia σ_y . Es el valor del esfuerzo que debe aplicarse sobre el material para iniciar su deformación permanente. Formalmente se define como el valor del esfuerzo que al ser aplicado al material provoca una deformación permanente del 0.2 %.

e) Esfuerzo último o esfuerzo máximo σ_{ut} o $\sigma_{máx}$. Superado el esfuerzo de fluencia, el material se endurece y admite un incremento de carga aunque con grandes deformaciones, correspondiendo esto a la carga máxima alcanzada en la prueba de tracción.

f) Esfuerzo de ruptura. En la gráfica, aparentemente disminuye la sollicitación más allá del esfuerzo máximo, en realidad, lo que sucede es que la sección transversal resistente de la probeta se reduce más rápido que el endurecimiento del material; de graficarse el esfuerzo considerando para su determinación el área instantánea, la curva siempre será creciente (gráfica real); sin embargo, en la gráfica ingenieril se considera el área inicial (la cual se reduce durante la deformación) mostrándose como un aparente disminución en el nivel de esfuerzo, hasta el momento en que la probeta se rompe.

Para aplicaciones de ingeniería, normalmente no se utilizan cálculos basados en esfuerzo ingenieril, el cual se define con base en el área original (antes de la deformación).

En la práctica, siempre existirá alguna heterogeneidad en el material, esto es, los valores determinados experimentalmente son representativos, en promedio, de las propiedades de cualquier muestra del material; sin embargo, siempre existirá una distribución normal, por lo que se deben definir los factores de diseño para garantizar así, que bajo las condiciones de servicio el material no falle.

4.4 Actividades

Realizar ensayos de tracción a materiales diversos, tales como metales y polímeros. Con base en los datos recabados, se deberá:

- a. Determinar los datos característicos como límite de proporcionalidad, cedencia superior e inferior (en el caso que corresponda), o límite de fluencia al 0.2%, esfuerzo máximo, deformación al esfuerzo máximo, deformación elástica máxima, deformación máxima, energía para la deformación elástica, energía a la fractura.
- b. Describir el tipo de comportamiento: dúctil, frágil, hiperelástico, inelástico.
- c. Analizar y explicar las razones por las que las deformaciones descritas mediante extensometría eléctrica son diferentes de las calculadas a través de los datos obtenidos de la máquina de pruebas (máquina universal).
- d. A partir de los datos de deformación generados por las galgas extensométricas, determine el módulo de elasticidad de los materiales ensayados. Compare los resultados obtenidos con los valores reportados en la literatura. ¿Qué concluye de esto?

4.5 Material

- Probetas estandarizadas de diferentes materiales (planas o cilíndricas)
- Galgas extensométricas
- Kit para instrumentación de galgas.
- Guía para la preparación y pegado de una galga extensométrica
- Equipo de adquisición de datos (Labview)

- Chasis cRIO
- Vernier
- Máquina universal de pruebas

4.6 Procedimiento

- Registrar las dimensiones de cada una de las probetas: longitud de trabajo, ancho y espesor.
- Realizar la instrumentación de las probetas con galgas extensométricas de acuerdo a lo visto en la Práctica 2.
- Se requiere instrumentar con galgas extensométricas en la superficie del espécimen a ensayar. La orientación de las galgas deberá corresponder con la dirección principal de deformación (colineal al eje de la probeta) y con la dirección transversal (perpendicular).
- La probeta instrumentada se montará por los extremos en las mordazas de la máquina de ensayos (figura 4.2).
- Programar la máquina de pruebas universales para que el movimiento del cabezal aplique la carga a velocidad de 5mm/min.



FIGURA 4.2 Disposición del espécimen a evaluar en la máquina universal (especimen cilíndrico)

- Después de instalar la probeta se realizan conexiones entre la galga extensométrica y la tarjeta de adquisición de datos.
- Seleccionar o programar el sistema LabVIEW para la adquisición y almacenamiento de datos.
- Ajustar los valores establecidos para cada galga de acuerdo con los parámetros de la misma (factor de galga y resistencia).
- Antes de iniciar la prueba, se calibra la celda de carga de la máquina universal.
- Ejecutar el programa de LabVIEW y, posteriormente, iniciar la prueba en la máquina.
- Para la construcción de curvas esfuerzo-deformación, se debe tomar en cuenta que la máquina de pruebas proporciona carga y desplazamiento instantáneos. La velocidad del cabezal de la máquina de pruebas es constante y se expresa como:

$$v = \frac{\Delta \ell}{t} \quad (4.5)$$

- Conocida la velocidad (5mm/min) y el desplazamiento instantáneo $\Delta \ell$, se puede conocer el tiempo instantáneo t despejándolo de la relación anterior. El registro obtenido de la adquisición de datos proporciona valores de deformación contra tiempo instantáneos.
- Por lo tanto, la variable común entre los datos que se obtuvieron de la máquina de pruebas y los obtenidos mediante la tarjeta de adquisición de datos para la confrontación de datos es el tiempo.

4.7 Resultados esperados

Además de reportar lo indicado en el numeral 4.4, para cada probeta, se deberán determinar:

- Módulo de Poisson
- Conocidos el módulo de Young y el de Poisson, determine el módulo de rigidez a corte:

$$G = \frac{E}{2(1+\nu)}$$

Y la constante de compresibilidad

$$k = \frac{E}{3(1-2\nu)}$$

4.8 Propuesta de trabajos

- Elaborar un reporte donde se describa el propósito del experimento, equipo y resultados obtenidos.
- Discutir las probables fuentes de errores.
- Comparar los resultados obtenidos con datos teóricos y calcular el porcentaje de error.

4.9 Cuestionario previo

- ¿En qué consiste un ensayo de tracción y qué datos se pueden obtener del mismo?
- ¿Qué aplicación tienen los datos generados de un ensayo de tracción?
- ¿Qué tipo de galgas extensométricas convienen para analizar los esfuerzos en un ensayo de tracción?
- ¿En qué consiste una máquina universal de pruebas? ¿Por qué de su nombre?
¿Qué elementos constituyen una máquina universal?

4.10 Referencias

- Mott Robert L., *Applied Strength of Materials*, Pearson Prentice Hall, USA, 2008.
- ASTM E8 / E8M - 15
Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials
- ISO 6892-1: "Metallic materials. Tensile testing. Method of test at ambient temperature", 2009.
- ISO 6892-2: "Metallic materials. Tensile testing. Method of test at elevated temperature", 2011.
- JIS Z2241, "Method of tensile test for metallic materials".
- ASTM D638, *Standard test method for tensile properties of plastics*.
- ASTM D828, *Standard test method for tensile properties of paper and paperboard using constant-rate-of-elongation apparatus*.
- ASTM D882, *Standard test method for tensile properties of thin plastic sheeting*.
- ISO 37, "Rubber, vulcanized or thermoplastic—determination of tensile stress-strain properties".

Práctica 5

Flexión en vigas

5.1 Objetivos

- Determinar experimentalmente la distribución de esfuerzos a lo largo de una viga en cantiléver.
- Analizar experimentalmente un problema de flexión.
- Obtener experimentalmente el módulo de elasticidad (Módulo de Young) y el coeficiente de Poisson de un elemento metálico.
- Realizar la comparación con los esfuerzos obtenidos analíticamente con los obtenidos del experimento.

5.2 Introducción

Los elementos mecánicos en los que la dimensión de un eje es mucho mayor que las correspondientes a los otros dos ejes se denominan vigas. Por su geometría, se puede considerar que en éstas su deformación es biaxial (en general, se desprecia su deformación en el ancho). Este tipo de elementos estructurales son ampliamente utilizados como bastidores de aviones y vehículos de carga, soportes para techos, puentes, edificios, anaqueles, grúas, entre otros. Las vigas se caracterizan por su perfil (sección transversal), longitud y material del cual están hechas.

Para esta práctica, se estudia una viga en voladizo en su forma más simple, esto es, el extremo empotrado soporta fuerza y momento y el otro se encuentra libre; además, su sección transversal es constante a lo largo de su eje longitudinal. En este elemento mecánico, la carga se puede aplicar de manera puntual o distribuida sobre cualquier sección de la pieza (figura 5.1a).

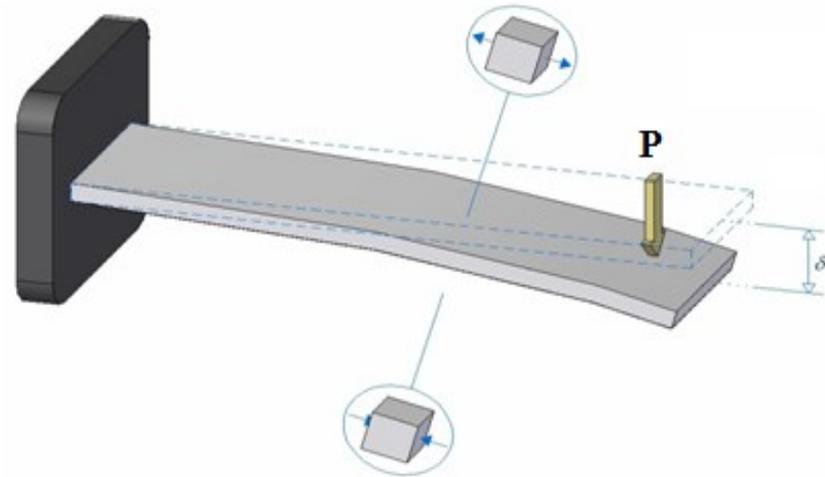


FIGURA 5.1a Los esfuerzos son uniaxiales en cualquier parte de la superficie de la viga

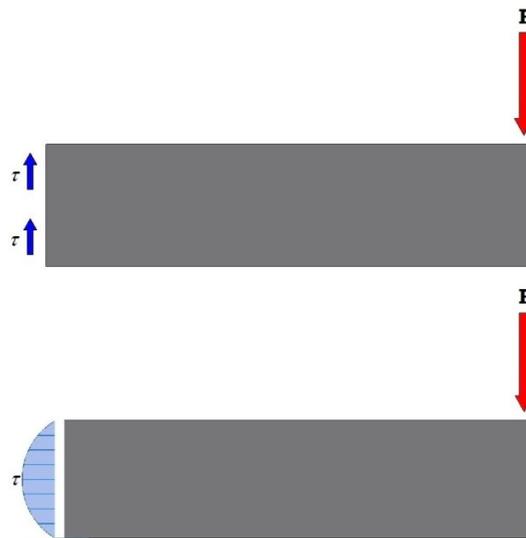


FIGURA 5.1b La carga P genera esfuerzos de corte que no se distribuyen de manera uniforme sino parabólica, siendo máximos en el plano medio y nulos en la superficie

5.3 Fundamentos

De acuerdo con el análisis de la figura 5.1, la deflexión δ de la viga generada por la carga P provoca esfuerzos de tracción en la parte superior y esfuerzos de compresión en la parte inferior. Por tanto, existirá un plano neutro en el que los esfuerzos sean nulos; asimismo, se presentarán esfuerzos de corte, de acuerdo con lo indicado en la figura 5.1b. Otra característica de la viga en cantiléver es que los esfuerzos son uniaxiales en cualquier parte de la superficie del elemento, excepto en las inmediaciones de la vecindad del punto de aplicación de la carga.

La fuerza de corte V se puede escribir como:

$$V = \frac{\Delta M}{\Delta x} \quad (5.1)$$

donde ΔM es el cambio del momento flexionante sobre un incremento de longitud Δx . Se puede demostrar que en una viga sometida a flexión los esfuerzos se expresan como:

$$\sigma = \frac{Mc}{I} \quad (5.2)$$

Donde $M = M(x)$ momento flector

c distancia del plano neutro a la posición de análisis $c_{\text{máx}} = \frac{t}{2}$

$I = \int y^2 dA$ Momento de inercia o segundo momento de área

Para el caso en análisis $I = \frac{1}{12}bh^3$

Por otra parte, para el caso de una condición de carga uniaxial la relación de esfuerzo con deformación está dada por:

$$\sigma = E\varepsilon \quad (5.3)$$

Para el caso de una viga en voladizo a la cual se le aplica una carga puntual, se tiene:

$$\varepsilon = \frac{6Px}{Ebt^2} = \frac{6M_f(x)}{Ebt^2} \quad (5.4)$$

donde P es la carga aplicada, b y t son los parámetros geométricos (ancho y espesor) que se muestran en la figura 5.2.

Los resultados pueden diferir ligeramente debido a errores experimentales, por lo tanto, el promedio será la mejor estimación de la carga. Conociendo de este modo la carga, los esfuerzos se pueden calcular mediante la siguiente relación:

$$\sigma = \frac{6Px_1}{bt^2} \quad (5.5)$$

Empleando la ley de Hooke, el esfuerzo uniaxial también se puede calcular directamente de la medición de deformación ε para un punto cualquiera de la viga en cantiléver:

$$\sigma_1 = E\varepsilon_1 \quad (5.7)$$

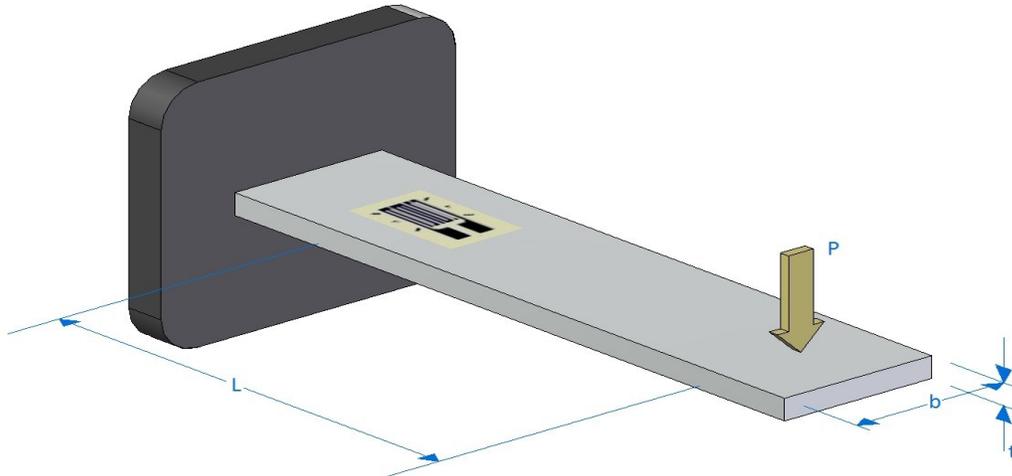


FIGURA 5.2 Parámetros geométricos de la viga en cantiléver

5.4 Actividades

Se analizará el comportamiento de una viga en cantiléver mediante un modelo que se instrumentará permitiendo medir la deformación mediante el uso de una galga extensométrica. Para generar la deformación, se aplicará una carga mediante un sistema de pesas que se aumentarán gradualmente.

5.5 Material

- Vigas de diferentes materiales (soleras)
- Galgas extensométricas
- Kit para instrumentación de galgas
- Guía para la preparación y pegado de una galga extensométrica
- Equipo de adquisición de datos (Labview)
- Chasis cRIO
- Pesas para aplicar carga
- Marco para aplicación de carga
- Vernier

5.6 Procedimiento

- Analizar el estado de esfuerzos de una viga en cantiléver para definir la ubicación de los extensómetros en ésta, con la finalidad de calcular el módulo de elasticidad. Para esto es necesario conocer solo una deformación, lo que equivale a

instrumentar una galga; sin embargo, se utilizan galgas extensométricas fijas a una distancia equidistantemente entre ellas a lo largo del eje longitudinal de la viga para observar el estado de deformaciones en diferentes puntos.

- Registrar las dimensiones de cada una de las vigas a estudiar (tabla 5.1).
- Instrumentar las diferentes vigas de acuerdo a lo visto en la Práctica 2.
- La posición de los extensómetros se realizará de forma paralela al eje principal de simetría en la cara superior de la viga y en la parte inferior de la misma viga se colocará perpendicular al eje.
- Realizar las conexiones pertinentes al chasis cRIO, verificando que se encuentre la tarjeta de adquisición de datos (figura 5.3)



FIGURA 5.3 Configuración de conexiones al chasis cRIO, en el caso de adquisición de una señal

- Seleccionar o programar el sistema para la adquisición y almacenamiento de datos en LabVIEW .
- Ajustar los valores establecidos para cada galga de acuerdo con los parámetros de la misma (factor de galga y resistencia).
- Configurar el marco de carga con los accesorios necesarios para ajustarlo al tipo de solicitaciones que sufrirá la viga, (figura 5.4).
- Para fines prácticos, la carga se aplica mediante los contrapesos en un punto central y cercano al extremo libre de la viga.

- Colocar gradualmente las pesas registrando las medidas de microdeformaciones para cada una de ellas, (tabla 2).
- Calcular las propiedades del material y compararlas con los datos teóricos.



FIGURA 5.4 Marco de carga configurado para pruebas de flexión con viga en cantiléver

5.7 Formato para la presentación de resultados

TABLA 5.1 Registro de datos de los diferentes materiales usados

Viga*	d [m] Distancia de aplicación de carga al extensómetro	b [m] Ancho del espécimen	h [m] Espesor del espécimen	y [m] Distancia del eje neutro a la superficie
Material 1				
Material 2				
Material 3				
Material 4				

*Se deberá registrar los diferentes materiales a usar

5.8 Resultados esperados

TABLA 5.2* Registro de resultados experimentales calculados

m [kg]	F [N]	M [N*m]	I [m ⁴] Momento de inercia	σ_{exp} [Pa]	E_{exp} [Pa]	V_{exp}	$\epsilon_{exp X}$	$\epsilon_{exp Y}$

*Se deberá elaborar una tabla igual para cada material a analizar

- Obtener los diagramas de fuerza de corte y momento flexionante de las vigas utilizadas en la práctica.
- Distribución de esfuerzos analítico y experimental en cada punto de localización de las galgas extensométricas.
- Determinar el módulo de elasticidad para cada material analizado.
- Determinar el coeficiente de Poisson para cada material.

5.9 Propuesta de trabajos

- Emplear diferentes apoyos: simples y empotrados para las vigas de diferentes materiales, las cuales deberán haber sido previamente instrumentadas y realizar ensayos de flexión en tres o cuatro puntos. Comparar resultados analíticos con los experimentales.

5.10 Cuestionario previo

¿Cuál es la razón de que se generen esfuerzos normales en una dirección donde la carga es nula?

¿Qué sucede en el caso de que la viga tenga cambios de sección en el plano perpendicular al eje longitudinal de ésta?

¿Desde un punto de vista físico (no la descripción matemática), qué representa el momento de inercia?

¿Cómo podría analizar el momento flector en una viga eliminando todo efecto de las fuerzas de corte? Esto es cómo cargar una viga simplemente apoyada, de tal forma que en una sección de la misma las fuerzas de corte sean nulas.

¿Cómo es posible determinar la flecha (desplazamiento en dirección y) de cualquier punto, fibra o partícula de la viga?

5.11 Referencias

Mott Robert L., *Applied Strength of Materials*, 5th ed., Agosto 31, 2007.

Russell C. Hibbeler, *Mechanics of Materials*, 9th ed., Enero 13, 2013.

Ferdinand Beer y Johnston, Jr., E. Russell, *Mechanics of Materials*. Enero 4, 2011.

Ansel C. Ugural (Autor), Saul K. Fenster, *Advanced Strength and Applied Elasticity*, 4th ed.

Jean-Pierre Bardet, *Experimental Soil Mechanics*, 1997.

Arun Shukla y James W. Dally, *Experimental Solid Mechanics*, 2a. ed., 2014.

Práctica 6

Torsión en barra de sección cilíndrica

6.1 Objetivos

- Comprender el fenómeno de torsión y sus efectos, así como la influencia de la sección transversal en la rigidez y resistencia de la barra.
- Evaluar experimental y analíticamente el módulo de rigidez a corte y los esfuerzos de corte en barras de sección cilíndrica.

6.2 Introducción

La torsión de una barra o eje se produce bajo la acción de un par aplicado (momento torsionante). El fenómeno de torsión se presenta ante todo en flechas o árboles de transmisión, así como en diferentes componentes de vehículos y maquinaria, tornillos, estructuras de automóviles y camiones, fuselaje de aviones, puentes, resortes helicoidales y muchas otras estructuras y componentes.

El problema de torsión pura no es usual, ya que en general aparece en combinación con momentos flectores y cargas axiales. Sin embargo, el estudio se puede considerar como general debido a que al tratarse de fenómenos elásticos es factible aplicar el principio de superposición de efectos; por lo que a partir de la solución de problemas simples se puede llegar a casos de sollicitaciones combinadas.

6.3 Fundamentos

Si una barra se sujeta a un par torsional en uno de sus extremos, durante la torsión, la sección transversal permanecerá constante (es decir circular), debido a que no se tiene restricciones en el giro. Uno de los extremos rota con respecto al otro un ángulo $\Delta\phi$ al cual se le conoce como ángulo de torsión (figura 6.1).

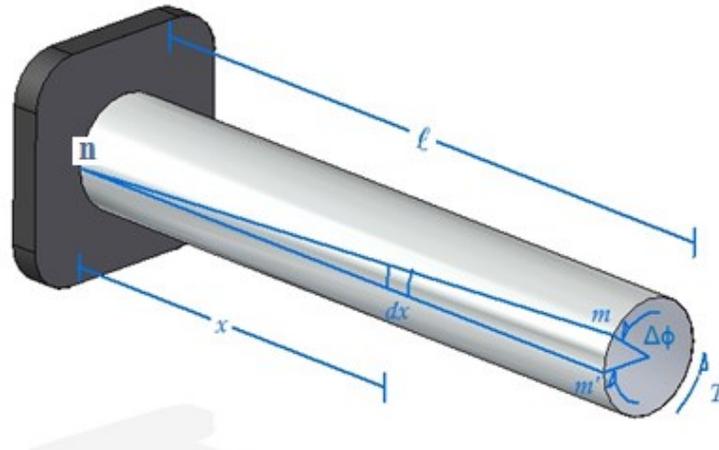


FIGURA 6.1 Barra de sección circular sometida a torsión

La línea nm gira y se coloca en la posición nm' debido a un par T aplicado en el extremo de la barra. Posteriormente, se toma un elemento diferencial dx de la barra y mediante un análisis geométrico del elemento diferencial, y considerando que para deformaciones pequeñas $\tan(\gamma_{\text{máx}}) = \gamma_{\text{máx}}$, se puede obtener una expresión para la deformación por cortante γ en cualquier punto x a lo largo de la barra. Se ha supuesto, además, que en esta condición no se altera la longitud l ni el radio R .

$$\gamma_{\text{máx}} = \frac{R\phi}{x} \quad (6.1)$$

Por otro lado, el esfuerzo cortante máximo $\tau_{\text{máx}}$ se genera en la superficie de la barra:

$$\tau_{\text{máx}} = \frac{TR}{J} \quad (6.2)$$

donde J es el momento polar de inercia. De acuerdo a la ley de Hooke se tiene que $\tau_{\text{máx}} = G\gamma_{\text{máx}}$, esta ecuación junto con la ecuación (6.2) se sustituye en (6.1), por lo que se llega finalmente a la siguiente relación:

$$\phi = \frac{Tx}{GJ} \quad (6.3)$$

G es el módulo de rigidez a corte, x es la distancia que se tiene desde el extremo fijo de la barra sometida a torsión a un punto cualquiera para la determinación del ángulo de corte ϕ . La deformación a corte también se puede obtener directamente de la medición de deformación leída mediante las galgas extensométricas (figura 6.2).

$$\gamma = 2\varepsilon$$

6.4 Actividades

Se reproducirá el efecto de torsión en una barra de sección circular, el modelo a usar se instrumentará permitiendo medir los efectos de torsión mediante el uso de galgas extensométricas. Para reproducir el efecto, se aplicará una carga mediante un sistema de brazo de palanca al cual gradualmente se le irá incrementando el peso.

6.5 Material

- Barras circulares de diferentes materiales
- Galgas extensométricas
- Kit para instrumentación de galgas
- Guía para la preparación y pegado de una galga extensométrica
- Equipo de adquisición de datos (LabVIEW)
- Chasis cRIO
- Pesas para aplicar carga
- Vernier
- Marco para torsión

6.6 Procedimiento

Se requiere instrumentar con galgas extensométricas en la superficie de la barra. La orientación de las galgas deberán corresponder con la dirección principal de deformación, es decir, para esta condición de carga (a torsión) el ángulo es de $\theta = 45^\circ$ con respecto al eje longitudinal del espécimen a analizar (figura 6.2).

Esto permitirá determinar el módulo de rigidez a corte, ya que se requiere de una galga orientada a 45° .



FIGURA 6.2 Barra instrumentada con galgas extensométricas

- Registrar las dimensiones de cada una de las barras a estudiar (tabla 6.1).
- Seleccionar el tipo de extensómetro que se utilizará.
- Proceder a la instrumentación con las galgas extensométricas seleccionadas.
- Realizar las conexiones al chasis cRIO, verificando que se encuentre la tarjeta de adquisición de datos. En este caso, se requerirá capturar más de una señal por lo que se deberá conectar cada galga a una entrada de la tarjeta de adquisición (figura 6.3).
- Seleccionar o programar el sistema LabVIEW para la adquisición y almacenamiento de datos.

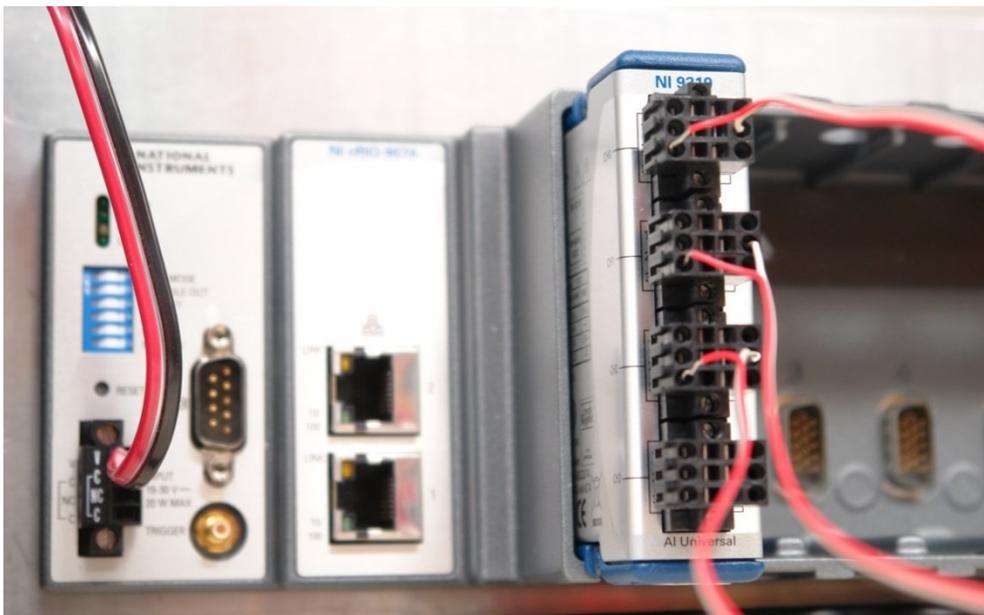


FIGURA 6.3 Configuración de conexiones al chasis cRIO, adquisición de tres señales

- Ajustar los valores establecidos para cada galga de acuerdo con los parámetros de la misma (factor de galga y resistencia).
- Colocar el espécimen en el marco de carga para torsión, el cual cuenta con un dispositivo tipo mordaza que posiciona la barra y da la condición deseada (figura 6.4). El par torsional se genera por medio de la polea (brazo de palanca) conectada a los contrapesos.
- Incrementar gradualmente el número de pesas, registrando los pesos que se van agregando, tomando para cada caso los datos de deformación (tabla 6.2).
- Calcular las propiedades del material y compararlas con los datos teóricos.



FIGURA 6.4 Disposición de montaje en el marco de carga para torsión

6.7 Resultados esperados

Con base en los datos recabados y considerando las relaciones presentadas al inicio de esta práctica, calcule:

- Módulo de rigidez a corte.
- Par torsional aplicado.
- Compare el par torsional calculado vs. el determinado mediante una celda de carga.
- Determine los esfuerzos de corte.
- En qué planos se presentan los esfuerzos de corte máximos.
- Determine los esfuerzos normales máximos y su dirección con respecto a los cortantes máximos.
- Calcule el ángulo de torsión.
- Grafique el par torsional contra ángulo de torsión. ¿Qué se puede concluir?

6.8 Formatos para la presentación de resultados

TABLA 6.1 Registro de datos de los diferentes materiales usados

Barra o tubo	D [m] Brazo de palanca	r [m] Radio del espécimen	e [m] * Espesor del tubo de espécimen	d [m] Distancia de aplicación de carga a extensómetro
Material 1				
Material 2				
Material 3				
Material 4				

*Solo cuando se trate de tubo

TABLA 6.2* Registro de resultados experimentales calculados

m [kg]	F [N]	M_T [N*m]	J [m ⁴] Momento polar	τ_{exp} [Pa]	G_{exp} [Pa]	γ_{exp}	$\epsilon_{exp X}$	$\epsilon_{exp Y}$

*Se deberá elaborar una tabla igual para cada material a analizar

6.9 Propuesta de trabajos

- Analice el efecto de utilizar barras de sección no circular en la distribución de esfuerzos.
- Analice el efecto de utilizar ejes huecos para la transmisión de par.
- ¿Existen casos en donde se utilicen barras de sección no circular, por ejemplo, cuadradas, hexagonales u octagonales? Mencione casos de aplicación. ¿Qué ventajas tendrá el uso de una barra hexagonal con respecto a una circular?
- En el caso de utilizar barras huecas o tubos de pared delgada, ¿qué ventajas se tendrán?
- Analice y explique cómo será el comportamiento de una barra con geometría diferente a la circular al ser sometidas a un momento torsionante.
- ¿A qué combinaciones de cargas pueden estar sometidos los ejes utilizados para la transmisión de par? Ejemplifique con tres casos prácticos diferentes.

6.10 Cuestionario previo

¿Qué es un eje o árbol de transmisión en ingeniería?

¿En qué condiciones de carga fallan los ejes de transmisión?

Indique 5 aplicaciones prácticas de ejes o árboles de transmisión.

¿Qué propiedades deberá tener el material utilizado en la fabricación de un eje?

Indique tres materiales empleados en la fabricación de ejes. Justifique su respuesta.

¿Qué favorecerá la falla de un eje de transmisión de par?

¿El material de un resorte está sometido a un momento de torsión durante su servicio?

6.11 Referencias

Mott Robert L., *Applied Strength of Materials*, 5th ed., Agosto 31, 2007.

Russell C. Hibbeler, *Mechanics of Materials*, 9th ed., Enero 13, 2013.

Ferdinand Beer and Johnston, Jr., E. Russell, *Mechanics of Materials*, Enero 4, 2011.

Ansel C. Ugural (Author), Saul K. Fenster, *Advanced Strength and Applied Elasticity*, 4th ed.

Jean-Pierre Bardet, *Experimental Soil Mechanics*, 1997.

Arun Shukla and James W. Dally, *Experimental Solid Mechanics*, 2nd ed., 2014.

James W. Dally, William F. Riley, *Experimental Stress Analysis*, 3rd sub ed.

Práctica 7

Fotoelasticidad

7.1 Objetivos

- Comprender el fenómeno de birrefringencia.
- Interpretar las imágenes de franjas observadas en un ensayo de fotoelasticidad de un modelo generado a partir de un elemento mecánico conocido.
- Comparar cualitativamente la distribución de esfuerzos en diferentes modelos fotoelásticos simples.
- Observar el efecto que tiene un concentrador de esfuerzos al aplicar una carga, así como, los efectos geométricos que disminuyen tal condición.

7.2 Introducción

La fotoelasticidad es un método experimental que permite observar gráficamente las variaciones de deformaciones y, por consecuencia, de esfuerzos en un elemento que es sometido a diferentes sollicitaciones de carga, especialmente los denominados concentradores de esfuerzo. Estas concentraciones localizadas se presentan por cambios en la geometría de una pieza (filetes, agujeros, escalones, cambios de diámetro en ejes, rosca, etc.), discontinuidades superficiales (muescas, marcas de maquinado, ralladuras) y defectos inherentes del material (inclusiones, poros, fisuras etc.).

La fotoelasticidad proporciona un medio visual de análisis de esfuerzos de un elemento que se somete a sollicitaciones, para lo cual se utilizan modelos de polímero transparente (policarbonato) con un cierto valor de birrefringencia que, bajo una sollicitación, presenta un patrón de franjas producto de la doble refracción óptica. Para elementos no transparentes, se puede recubrir con una resina birrefringente, y de esta manera se observa el patrón de distribución de esfuerzos. La resina es muy útil para casos en que se desee analizar un elemento estructural durante su servicio.

Este tipo de análisis es una herramienta alterna a la extensometría eléctrica, aunque la fotoelasticidad se encuentra catalogada dentro de las de campo, ya que permite evaluar el estado general de esfuerzos en un modelo o elemento mecánico, pero que permite

puntualizar donde se encuentran presentes las mayores condiciones de esfuerzo. Los resultados obtenidos mediante fotoelasticidad pueden ser comparados con los que se generan mediante el método de elementos finitos, un claro ejemplo se presenta cuando se analizan problemas de concentración de esfuerzos, ya que por medio de la técnica de fotoelasticidad es posible obtener imágenes como la mostrada en la figura 7.1, en donde los colores indican distintas intensidades de esfuerzo sobre el modelo analizado. Sin embargo, esta técnica tiene la limitante de no poder analizar esfuerzos en zonas ocultas en virtud de que se requiere de una fuente de luz.

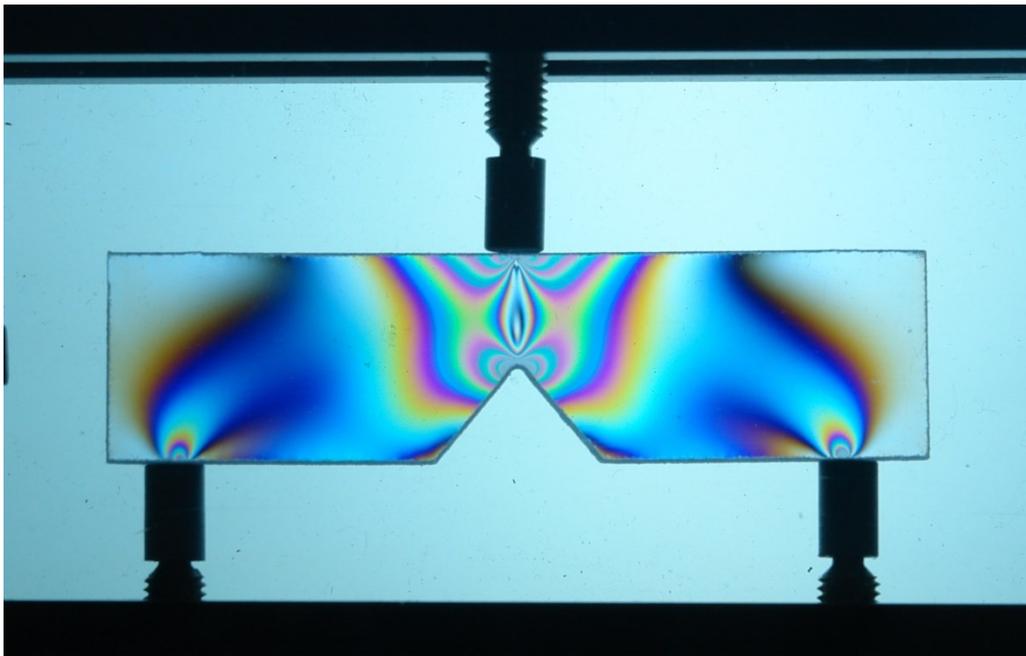


FIGURA 7.1 Modelo fotoelástico en el que se visualizan franjas que indican el nivel de esfuerzos generados por la imposición de una carga

7.3 Fundamentos

La técnica de fotoelasticidad se presenta por fenómenos de refracción de la luz, con este concepto se tiene que la birrefringencia (doble refracción) es el fenómeno óptico que se observa cuando una radiación luminosa incide sobre un medio isótropo, y esta circunstancia cambia a una condición anisotrópica cuando se somete a un estado de esfuerzos. La onda de luz se descompone en dos distintas que se propagan en diferentes direcciones. La primera sigue las leyes normales de la refracción y se llama rayo ordinario; la otra tiene una velocidad y un índice de refracción variables y se llama rayo extraordinario. Ambas ondas están polarizadas perpendicularmente (figura 7.2).

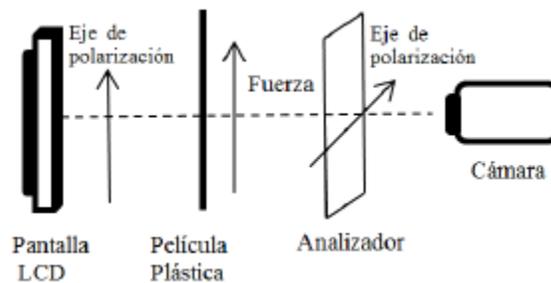


FIGURA 7.2 Principio de funcionamiento de un polariscopio plano (tomado de Briñez de Leon, J. C. Restrepo; M. A., López G. F.E., Métricas de similitud aplicadas para análisis de imágenes de fotoelasticidad, Dyna rev.fac.nac.minas vol.80 no.179, Medellín, Mayo/Junio 2013).

Con este fenómeno es posible que los esfuerzos inducidos en el modelo fotoelástico se puedan visualizar como franjas claras y oscuras para una fuente de luz monocromática, o como franjas de colores para una fuente de luz blanca. La magnitud y dirección de los esfuerzos se puede determinar examinando el modelo de franja relacionado con cada modelo que se esté analizando. Dos tipos diferentes de franja se pueden observar en los modelos fotoelásticos:

- Franjas isóclinas. Se muestran áreas oscuras que se sitúan en los puntos donde se presenta un esfuerzo principal que es paralelo al plano de polarización. Para observar dicho efecto se requiere cambiar el plano de rotación del polarizador, lo que permite visualizar la dirección de los esfuerzos principales sobre el modelo entero.
- Franjas isocromáticas. Se presenta un patrón de franjas de colores que permiten visualizar el estado de esfuerzos y los efectos de concentradores de esfuerzo de manera más clara, ya que cada color da información del estado de las solicitaciones.

7.4 Actividades

Elaborar diferentes modelos a escala de elementos estructurales o mecánicos en un acrílico fotoelástico, éstos serán sometidos a las mismas condiciones de apoyo y cargas del elemento real.

Como complemento se contará con modelos con distintos tipos de concentradores de esfuerzos a los cuales se les aplicará carga para observar los efectos que tienen éstos en la distribución de esfuerzos.

7.5 Material

- Placa de acrílico fotoelástica
- Modelos fotoelásticos con concentradores de esfuerzo
- Fuente de iluminación
- Placas polarizadoras
- Bastidor
- Cámara fotográfica

7.6 Procedimiento

- Seleccionar un elemento o dispositivo mecánico que se encuentre sometido a condiciones de carga.
- Transferir el elemento mecánico a analizar a la placa fotoelástica, en este caso el modelo puede escalarse.
- Seccionar el modelo teniendo precaución en su corte y manipulación para evitar afectar las propiedades fotoelásticas del acrílico.
- Colocar el modelo fotoelástico en el bastidor sujetándolo de acuerdo a el tipo de sollicitaciones que se le impondrán (figura 7.3).
- Colocar las placas polarizadoras al bastidor.
- Ubicar la fuente de iluminación en la parte posterior del bastidor
- Aplicar carga gradual al modelo fotoelástico mediante los tornillos del bastidor o bien configurando ésta en función de las sollicitaciones que considere que sufrirá el modelo en el uso cotidiano.
- Registrar mediante un archivo fotográfico las variaciones que sufre el modelo al variar la carga.
- Se analizará y se observa la distribución de esfuerzos los cuales se representan por las franjas generadas producto de la carga.
- Comparar las imágenes del registro fotográfico interpretando qué efecto provoca la variación de carga en el modelo.
- Para complementar la práctica, se tendrán a disposición modelos con diferentes tipos de concentradores de esfuerzos para visualizar el tipo de distribución de esfuerzos que cada uno de ellos provoca al estar sujetos a sollicitaciones.

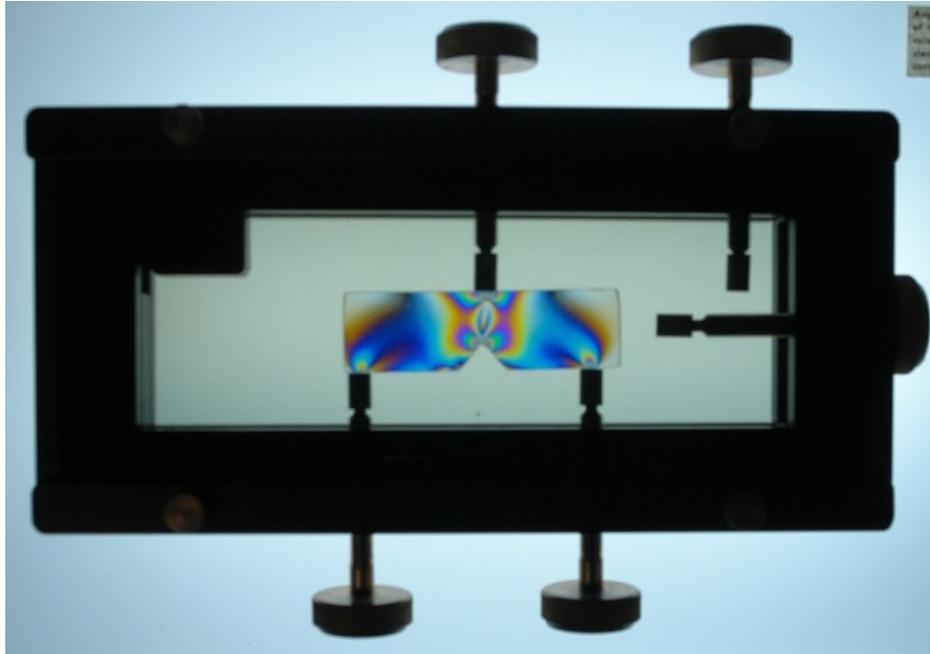


FIGURA 7.3 Posicionamiento del modelo fotoelástico en el bastidor

7.7 Propuesta de trabajos

- Compare la imagen obtenida mediante los polarizadores con la distribución de esfuerzos (deformación) determinada a partir del análisis del fenómeno mediante paquetería de elemento finito.
- Para el caso de los modelos fotoelásticos, generalmente, se utilizan materiales poliméricos, como por ejemplo policarbonato. Explique qué sucede con su estructura al ser sometido a una sollicitación.
- Explique, brevemente, y compare el patrón de franjas observadas para cada modelo fotoelástico sometidos a cargas.

7.8 Cuestionario previo

- ¿Cuáles son los efectos de los concentradores de esfuerzos? Investigue los efectos para una discontinuidad de geometría circular, elíptica, aguda. ¿Existe diferencia cuando la discontinuidad es interior de cuando es superficial?
- ¿Cómo se define el fenómeno de refracción y polarización?
- ¿Qué es la fotoelasticidad?
- ¿Qué características ópticas se requieren cumplir para que un material sea fotoelástico?

- Explique la razón por la cual la fotoelasticidad puede ser utilizada en forma cuantitativa.
- ¿Qué ventajas o desventajas acarrea el uso de luz monocromática?
- Investigue y explique los principios teóricos en los que está basada la fotoelasticidad.

7.9 Referencias

- Arun Shukla and James W Dally, *Experimental Solid Mechanics*, 2nd ed., 2014.
- James W. Dally, William F. Riley, *Experimental Stress Analysis*, 3rd Sub Edition 1991.
- Alessandro Freddi, Giorgio Olmi, Luca Cristofolini, *Experimental Stress Analysis for Materials and Structures: Stress Analysis Models for Developing Design Methodologies*, Springer Series in Solid and Structural Mechanics, 2015.
- Srinivas J., *Stress Analysis and Experimental Techniques: An Introduction*, Alpha Science, 2011.
- Doyle James F., *Modern Experimental Stress Analysis: Completing the Solution of Partially Specified Problems*, Wiley, 2004.

Anexos

A) Guía de instalación de galgas extensométricas

B) Guía de programación en LabVIEW para strain gage

A. Guía de Instalación de galgas extensométricas

Introducción

Los medidores de deformación eléctricos (galgas extensométricas) funcionan a través de cambios en su resistencia, producto de su deformación, la cual si han sido adecuadamente instaladas será igual a la del sustrato en el que se encuentre. Para esto se requiere básicamente de un puente Wheatstone.

Como ha sido mencionado, la deformación del material se determinará con base en la de la galga (incremento de longitud), ya que al estar firmemente adherida ésta al componente que se pretende evaluar y dado que la resistencia del material de la galga variará al modificarse su longitud, entonces ese cambio en la resistencia producto de la deformación da como resultado que el circuito eléctrico del puente de Wheatstone salga del equilibrio, el cual se obtiene al modificar una resistencia variable R_2 instalada en los brazos del

puente. En este caso, para la condición de equilibrio se cumple que $R_x = \frac{R_1 R_3}{R_2}$, donde R_1 ,

R_3 presentan valores fijos y R_2 es la resistencia variable y R_x es el valor a medir. Para medir el desequilibrio en el puente, se emplea un galvanómetro, donde la corriente que fluye a través de éste es proporcional al cambio en la resistencia.

Para garantizar que los datos arrojados por las galgas extensométricas sean los correctos, es importante colocar adecuadamente éstas y tener en cuenta otros factores como el tipo de ensayo, las elongaciones que se pueden presentar, temperatura de trabajo, etc.

Objetivos

- Que el alumno aprenda la técnica para colocar galgas extensométricas de la forma adecuada.
- Que el alumno sea capaz de instrumentar un elemento mecánico con galgas extensométricas.

En este anexo se desarrollará la metodología para el correcto manejo y pegado de galgas extensométricas a elementos mecánicos.

Material

- Desengrasante CSM o Alcohol Isopropílico GC-6
- Papel de lija de carburo de silicio (220, 320, 400, 600)
- Acondicionador A
- Neutralizador 5A
- Pegamento M-Bond 200 adhesivo
- Gasas o material para limpieza
- Cinta de celofán PCT-2A
- Pinzas de presión
- Pinzas de punta
- Galgas extensométricas
- Lápiz HB
- Calibrador Vernier
- Cable de tres líneas
- M-Flux AR activated rosin soldering flux (equivalente a pasta para soldar)
- M-coat A (Barniz protector de la galga)
- Guantes de látex

Procedimiento

1) *Preparación de la superficie*

- Se deberá limpiar perfectamente el área donde se instrumentará la galga removiendo restos de pintura, óxido o cualquier material ajeno al elemento mecánico a estudiar, asimismo, se debe eliminar polvo y grasa (figura A.1).
- Se deberá eliminar el limpiador o desengrasante con las gasas usando éstas una sola vez y en un solo sentido, hasta remover completamente cualquier residuo.

Materiales como titanio y muchos plásticos reaccionan con los solventes, en este caso se utilizará alcohol isopropílico.

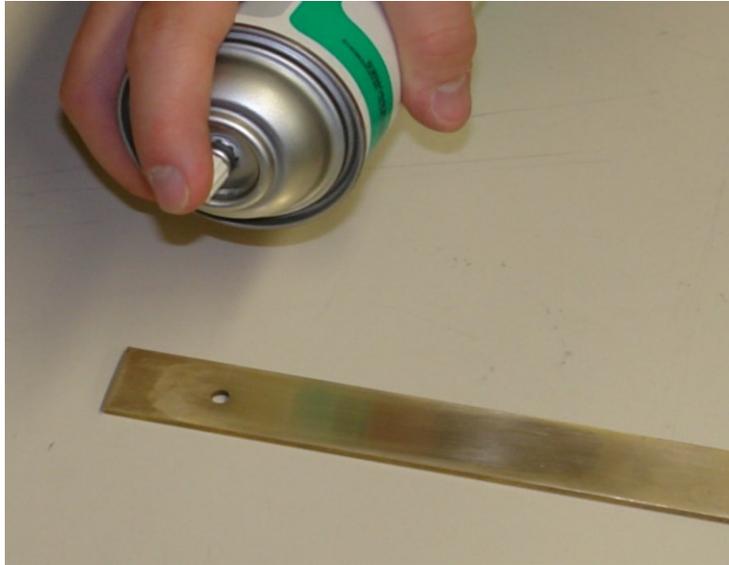


FIGURA A.1 Limpieza de la zona de instalación de la galga

- Lijado. Este proceso tiene la finalidad de mejorar las condiciones de anclaje del adhesivo con el material a instrumentar.

Antes de iniciar el proceso de desbaste, se debe aplicar una película de acondicionador lo que facilitará la operación de lijado. En este caso, se iniciará con un papel de lija de carburo de silicio de grano 180 con el que se desbastará la superficie hasta eliminar imperfecciones en la superficie (figura A.2).

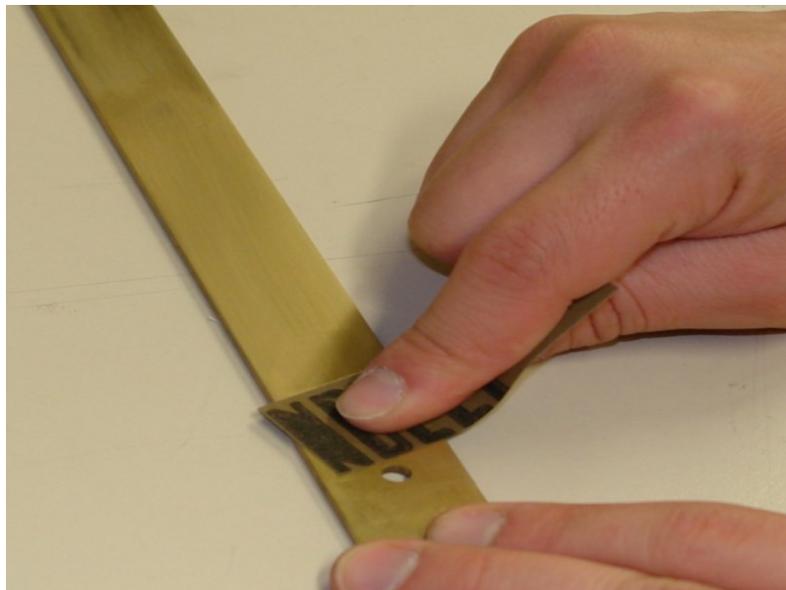


FIGURA A.2 Desbaste abrasivo en la zona superficial donde se pegará la galga

Cuando se tiene una superficie uniforme, se procederá a limpiar con una gasa limpia retirando los residuos dejados por el proceso abrasivo, la gasa se deberá cambiar por una nueva hasta retirar por completo la suciedad.

Se procederá al cambio de papel de lija por una más fina (240), aplicando el mismo procedimiento (aplicación de acondicionador, desbaste y limpieza). El proceso se continúa gradualmente hasta llegar a la lija 600. Es importante recalcar que tanto el movimiento de desbaste con las diferentes lijas y el de la gasa en el proceso de limpieza deberá ser en un solo sentido.

- Limpieza final. Se deberá eliminar cualquier residuo del proceso abrasivo con las gasas limpias y se procederá a desengrasar perfectamente la superficie trabajada. A partir de este paso, no se debe manipular el área donde se pegará la galga y en lo posible se evitará contaminarla.
- Marcado de ejes de referencia. En la superficie preparada se deberá señalar la correcta colocación del extensómetro, para lo cual se procederá a marcar ejes de referencia con un lápiz HB si el material de estudio es aluminio o un bolígrafo si se trata de acero. Las líneas trazadas deberán ser perpendiculares entre sí y deberán orientar la galga en la dirección de los esfuerzos normales que se pretende evaluar (figura A.3).

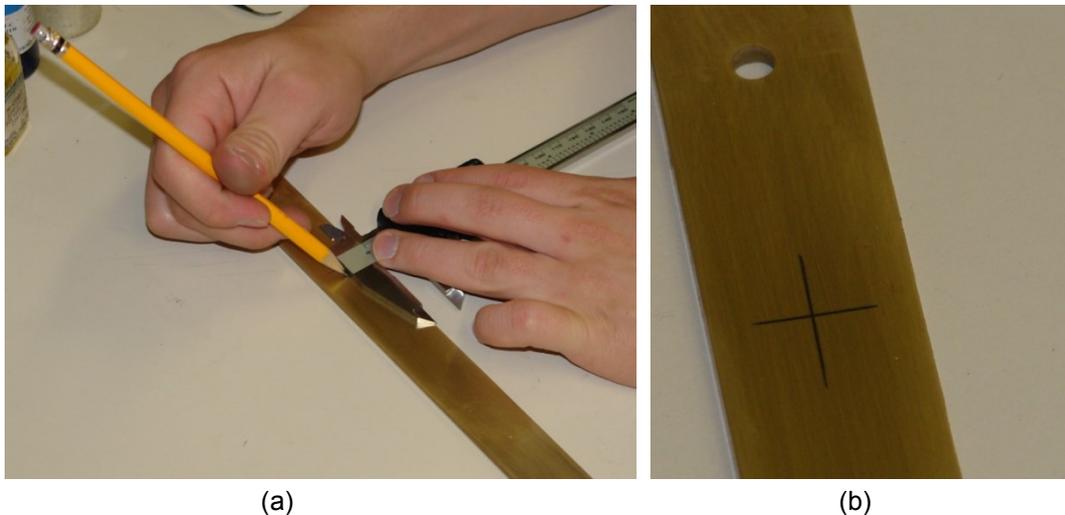


FIGURA A.3 (a) Trazo de ejes con el auxilio de vernier. (b) Los ejes deberán ser perpendiculares entre sí

- Alcalinidad. Para garantizar la fijación de los ejes en la probeta, se deberá aplicar neutralizador en la zona marcada (figura A.4) dejándolo reposar por al

menos dos minutos, posteriormente, se procederá a limpiar los excesos de grafito o tinta con una gasa limpia, se repetirá el proceso hasta garantizar haber removido cualquier residuo de contaminantes. El neutralizador permitirá que el grafito se adhiera a la superficie del espécimen dejando las marcas visibles.



FIGURA A.4 Aplicación de neutralizador sobre la marca de grafito

2) *Pegado de las galgas*

Una vez lista la superficie se procederá a pegar la galga en el material base, de acuerdo con el siguiente procedimiento:

Utilizando las pinzas de punta debidamente desengrasadas y limpias se extraerá del empaque el extensómetro, se deberá tener especial cuidado en la manipulación de éste evitando cualquier daño. Se posicionará sobre la superficie preparada del espécimen acomodándolo de tal manera que se oriente con los ejes previamente trazados. Para facilitar la instalación, el extensómetro cuenta con marcas que deberán coincidir con los ejes trazados.

- Una vez orientada la galga, se cortará un trozo de cinta de celofán (PCT-2A) de aproximadamente 6 centímetros, ésta deberá adherirse en uno de sus extremos al material base de la probeta a una distancia aproximada de un centímetro de donde está colocado el extensómetro. Se procederá a deslizar la cinta sobre la probeta y la galga evitando que esta última se mueva. Es necesario evitar que se formen burbujas de aire durante el proceso (figura A.5).



FIGURA A.5 Orientación del extensómetro previa al pegado

Una vez realizado el proceso anterior, se procederá a desprender la cinta de uno de sus extremos, en este paso es necesario mantener un ángulo entre la probeta y la cinta de menos de 40° ; el extensómetro deberá quedar adherido a la cinta, una vez que suceda esto y se sobrepase la zona del pegado de la galga se dejará expuesta doblando la cinta y pegándola sobre sí misma (figura A.6).

Es muy importante que el proceso de desprendimiento de la cinta se haga con cuidado para evitar dañar o deformar la galga, dado que esto puede tener efectos permanentes a la misma, influyendo en las lecturas.

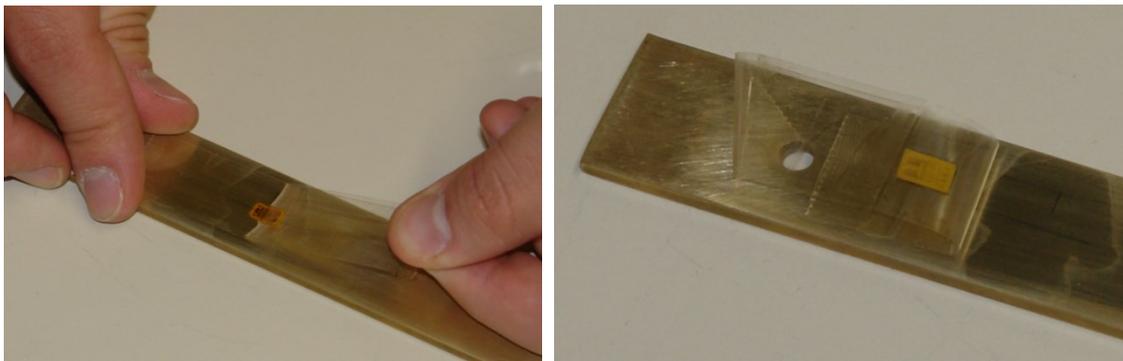


FIGURA A.6 Preparación de la galga para aplicar pegamento

- Para este paso es necesario entender el proceso antes de comenzar, ya que es importante realizar lo indicado en los incisos a, b y c de manera continua:

- a) Se deberá aplicar una película delgada de catalizador sobre la galga, evitando excederse en el mismo. Posteriormente, aplicar el pegamento (M-Bond 200), bastará con poner una gota, ésta se depositará en la zona de contacto entre la cinta y la probeta (figura A.7).



FIGURA A.7 Aplicación del catalizador y pegamento de la galga

- b) Desprender la cinta e ir deslizando de forma gradual con el apoyo de una gasa, haciendo presión firme para dejar solo una fina película de pegamento entre la galga y la probeta (figura A.8a). Este proceso deberá hacerse manteniendo la cinta en un ángulo de menos de 10 grados respecto de la probeta.
- c) Presionar el extensómetro por cinco minutos con una carga constante con el auxilio de las pinzas de presión, es importante colocar una placa de hule en la zona de contacto con la cinta y una placa de aluminio sobre la misma para transmitir una presión uniforme y evitar dañar la galga (figura A.8b).



(a)

(b)

FIGURA A.8 (a) Pegado de la galga. (b) Presión sobre la galga

- Una vez transcurridos los 5 minutos se retirará la pinza y se desprenderá la cinta adhesiva. Para este proceso, se deberá mantener un ángulo de 180° entre la superficie adhesiva de la cinta y la probeta para evitar despegar o dañar la galga (figura A.9). Es necesario revisar que el extensómetro haya quedado perfectamente adherido.

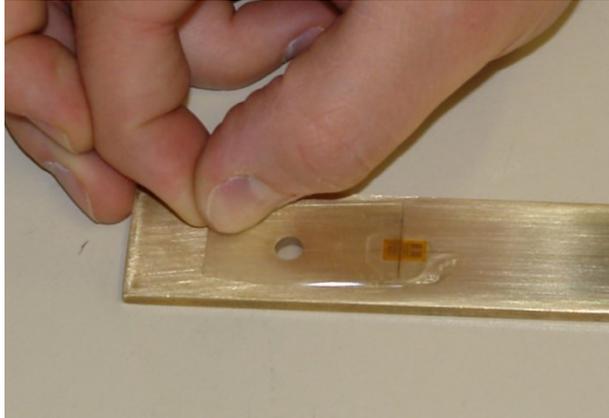


FIGURA A.9 Desprendimiento de la cinta de la probeta con la galga adherida al espécimen a analizar

3) Soldado de terminales

- Preparación de cables a utilizar. Se deberán exponer ambos extremos de los cables, se unirán dos de ellos trenzándolos en cada punta manteniendo siempre los mismos cables, se procederá a estañar para garantizar su soldadura (figura A.10).
- Se recomienda pegar con cinta adhesiva el extremo de los cables sobre la probeta, permitiendo posicionar las terminales de la galga coincidiendo con las puntas estañadas del cable. Se deben evitar picos y soldaduras opacas (figura A.10). Como pasta para soldar se utilizará el M-flux AR.
- El contacto entre el cautín y la galga no debe ser mayor que 2 segundos, si se sobrecalienta ésta puede ocasionar que se queme o en su defecto que se deteriore el extensómetro.

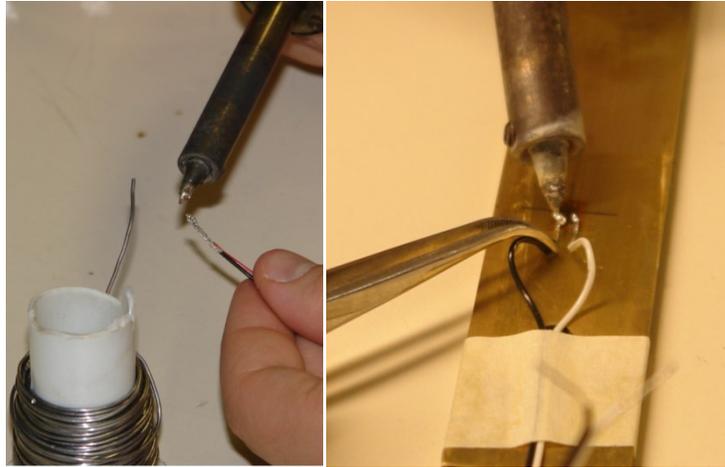


FIGURA A.10 Estañado de los extremos de los cables y soldado a las terminales del extensómetro

- Una vez soldadas las terminales del extensómetro se deberá verificar que exista continuidad en el extremo libre de los cables. De no ser así, se deberá revisar los puntos de soldadura o verificar si se dañó la galga.

4) *Recubrimiento de la galga*

- Finalmente, la zona de soldadura deberá cubrirse inmediatamente después de terminado el proceso, para lo cual se aplicará una capa de barniz (M-Coat A), esta película evitará efectos de humedad y posibles daños mecánicos en la galga (figura A.11).
- Asimismo, dependiendo del ambiente donde se realizará la prueba, se puede llegar a utilizar una capa de silicón o cera para una mayor protección.

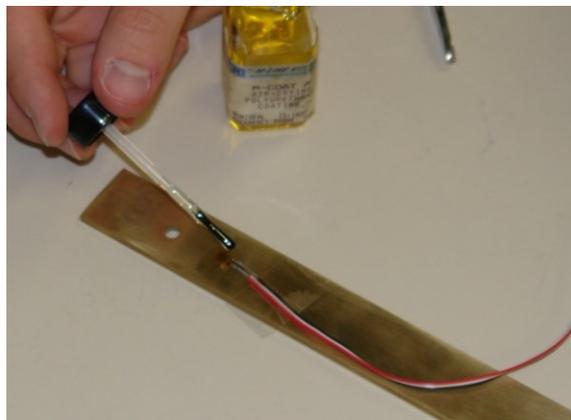


FIGURA A.11 Recubrimiento de protección para el ambiente

B) Guía de programación en LabVIEW para strain gage

Guía de programación para la adquisición y almacenamiento de datos

Iniciar LabVIEW

La ventana *Getting Started* que se muestra en la figura B.1 es la que aparece cuando se inicia el programa de LabVIEW. Esta ventana se puede utilizar para crear nuevos VIs, seleccionar o abrir los archivos más recientes, buscar ejemplos y abrir la ventana de ayuda LabVIEW Help. También se puede acceder a fuentes de información que ayudan al usuario a aprender sobre LabVIEW, como son manuales específicos de aplicaciones o fuentes del sitio Web de National Instrument, www.ni.com.



FIGURA B.1 Ventana de inicio de LabVIEW

Esta ventana desaparece cuando se abre un archivo existente o se crea uno nuevo, y nuevamente aparece cuando se cierran todos los paneles frontales y diagramas de bloques. También se puede desplegar esta ventana cuando se selecciona *View Getting Started Window*.

Adquiriendo una señal

1. Abrir un nuevo *Real-Time project* en la sección “New” de la ventana de *Getting started*.
2. Seleccionar la carpeta donde se desea guardar el programa y escribir un nombre para el proyecto y dar click en *siguiente*.

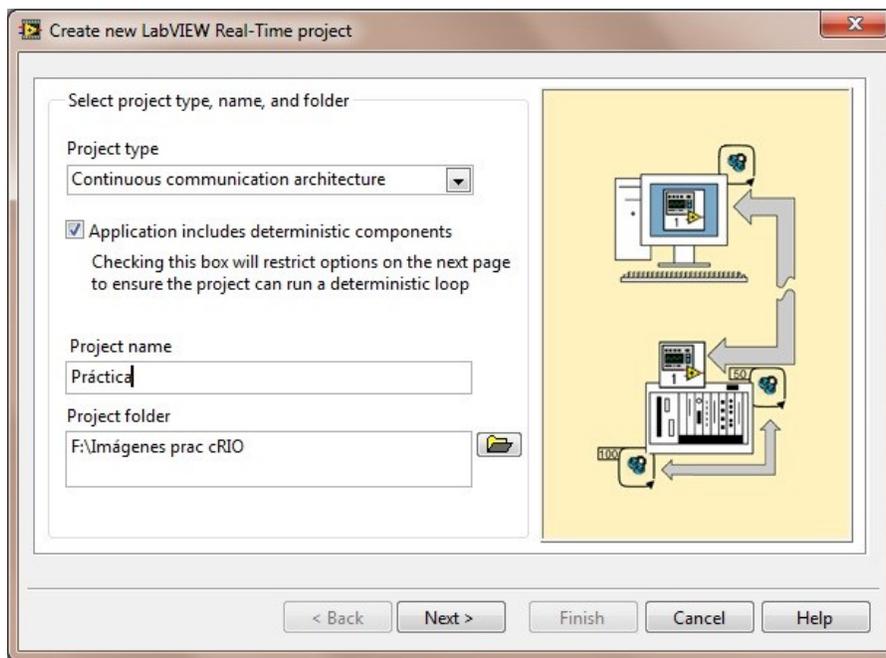


FIGURA B.2 Ventana emergente de proyecto de real time nuevo, con la ruta y nombre del proyecto ya establecidos

3. Establecer la configuración de la tarjeta con un ciclo nada más "One loop". Y hacer click en *siguiente* (figura B.3).

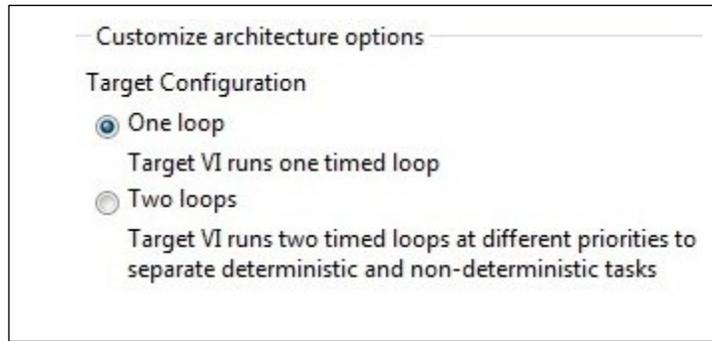


FIGURA B.3 Selección del número de ciclos de tiempo que tendrá el VI principal

4. Buscar la tarjeta en: "Real-Time Compact RIO" y seleccionar la "NI-cRIO9074-016E5835", (figura B.4). Hacer click en "Ok". Aceptar en el cuadro que especifica el modo de programación dejándolo como "Scan Interface".

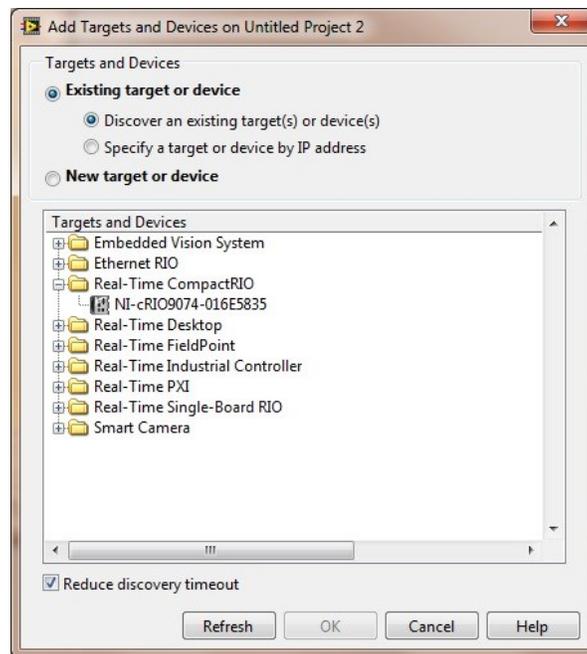


FIGURA B.4 Agregar tarjetas al proyecto de LabVIEW.
Carpeta de Real-Time CompactRIO extendida

5. Al regresar a la ventana de configuración del proyecto, hacer click sobre *next* y en la siguiente ventana, deshabilitar el recuadro que dice "Open VIs when finished" y terminar el procedimiento con el botón *Finish*.
6. Cuando ya se terminó la creación del proyecto, se desplegará la ventana del

explorador de proyecto (figura B.5), en ésta se puede acceder a todo lo relacionado con el proyecto, ya sea que esté en la computadora o en el chasis cRIO.

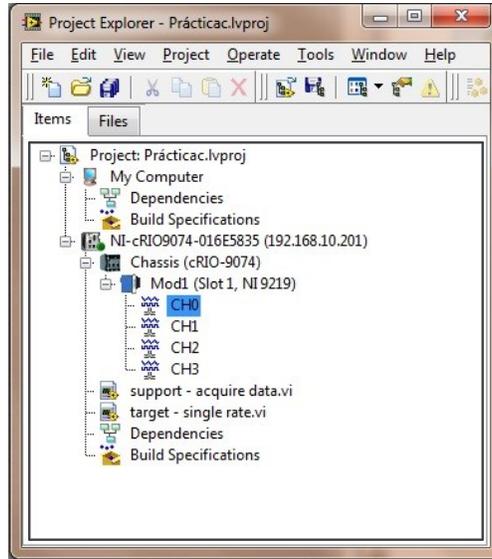


FIGURA B.5 Explorador de proyecto con proyecto de Real-Time

7. Arrastrar el VI de *target - single rate.vi*, desde la parte del chasis hacia la parte del proyecto de “My Computer”. Y abrir el archivo llamado “target - single rate.vi” que ahora se encuentra en el proyecto en “My computer”. Se desplegará una pantalla con el programa que tiene el sistema predeterminado. Éste se tendrá que modificar para tener el programa que permita medir la deformación de la galga. Con el comando Ctrl + T la pantalla se dividirá en dos partes iguales para mostrar el *panel frontal* (izquierda) y el *diagrama de bloques* (derecha) al mismo tiempo (figura B.6).

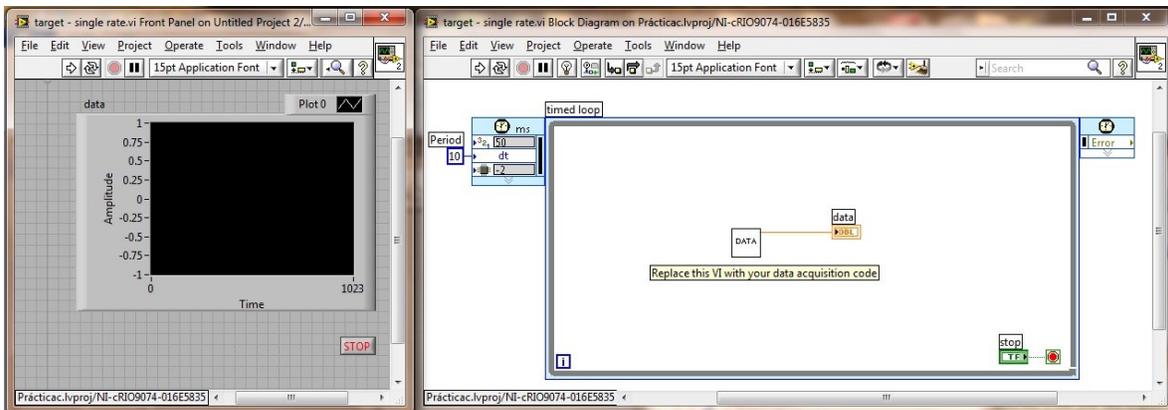


FIGURA B.6 *target - single rate.vi*, este programa es creado por default en el proyecto

8. Eliminar el ícono de "DATA", el cuadro de texto que dice "Replace this VI with your data acquisition code" y el cable que conecta "DATA" con la variable "data".
9. Hacer click derecho sobre cualquier parte del ciclo de tiempo (rectángulo llamado "timed loop" que encierra todos los íconos), se selecciona el ícono de "Convert Radiometric Strain Gauge Reading (scalar).vi" que se encuentra en la siguiente ruta:

Functions>>User Libraries>>Express User Libraries>>Radiometric Strain

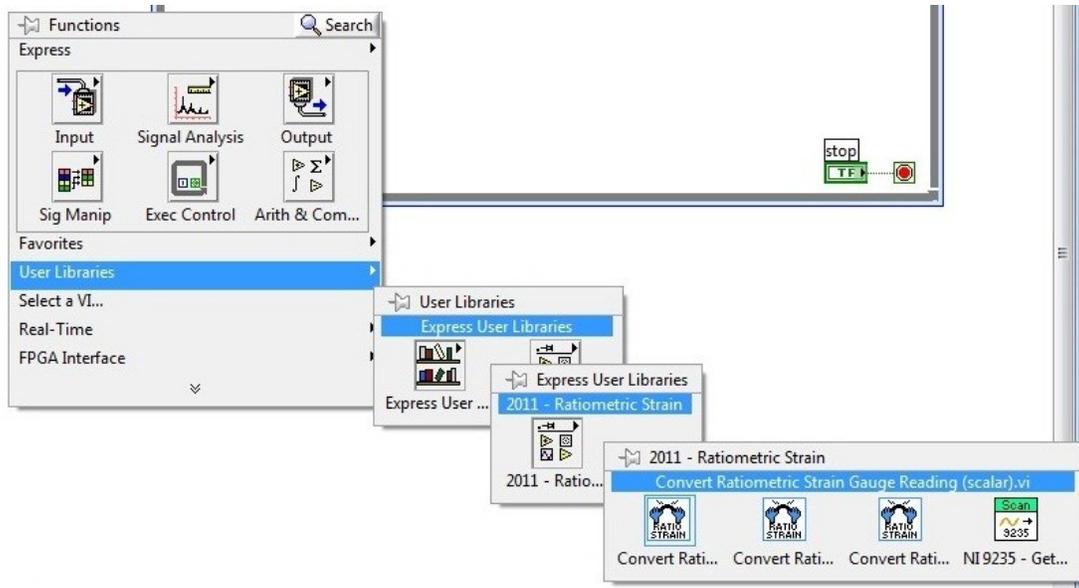


FIGURA B.7 Ruta para "Ratio Strain"

10. Colocar el ícono a la izquierda del ícono de "data" y dentro del cuadro del ciclo de tiempo. A partir de este punto se nombrará este ícono como "Ratio Strain".

Al colocar el puntero del ratón sobre el ícono de "Ratio Strain", se muestran las entradas de información y a la derecha, la única salida (figura B.8).



FIGURA B.8 Entradas y salidas de información del ícono de "Ratio Strain"

Dejando el puntero del ratón sobre cualquiera de los rombos del ícono (entradas y salidas de información) aparecerá una ventana con su nombre.

11. De las entradas del lado izquierdo del ícono de “Ratio Strain”, hacer click en botón derecho sobre la entrada azul llamada “Bridge configuration”. Seguir la ruta Create>>Constant y aparecerá un cuadro de texto azul, hacer click sobre la flecha del lado derecho del mismo y seleccionar la primera opción "Qtr Bridge", el cuadro de texto deberá quedar como en la figura B.9.

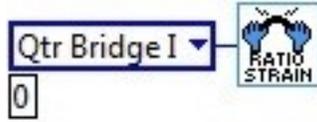


FIGURA B.9 Selección de la configuración del puente de Wheatstone

12. Para obtener la expresión de deformación, se necesitan ingresar al programa algunos valores. Éstos son GF, Rg y Vinit, que son: el factor de la galga, la resistencia de la galga y el voltaje inicial para ajustar la medición, respectivamente. Estos valores están indicados por el fabricante para cada galga.

Por lo tanto, será necesario crear constantes numéricas, hacer click en botón derecho sobre la entrada del lado derecho “Rg” del ícono “Radiometric Strain”, y seguir la ruta Create>>Constant. Establecer el valor correcto de resistencia de la galga. Repetir el procedimiento para la entrada siguiente “GF”. La sección deberá quedar como se muestra en la figura B.10, pero con los valores de la galga que se está colocando.

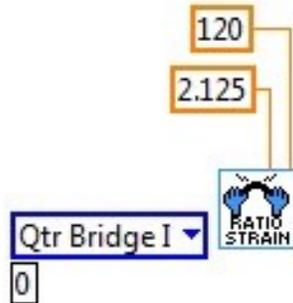


FIGURA B.10 Constantes de la galga

13. La información de entrada será proporcionada por el canal que tenga la galga conectada, para ligarlos. Hacer click en botón derecho sobre la entrada “Vsg” en “Ratio Strain”, situada en la parte superior del ícono y seguir la ruta, (figura B.11):

Create>> Shared Variable Node >> NI – cRIO9074 – 016E5835 >> Mod1 >> Chassis >> Ch0

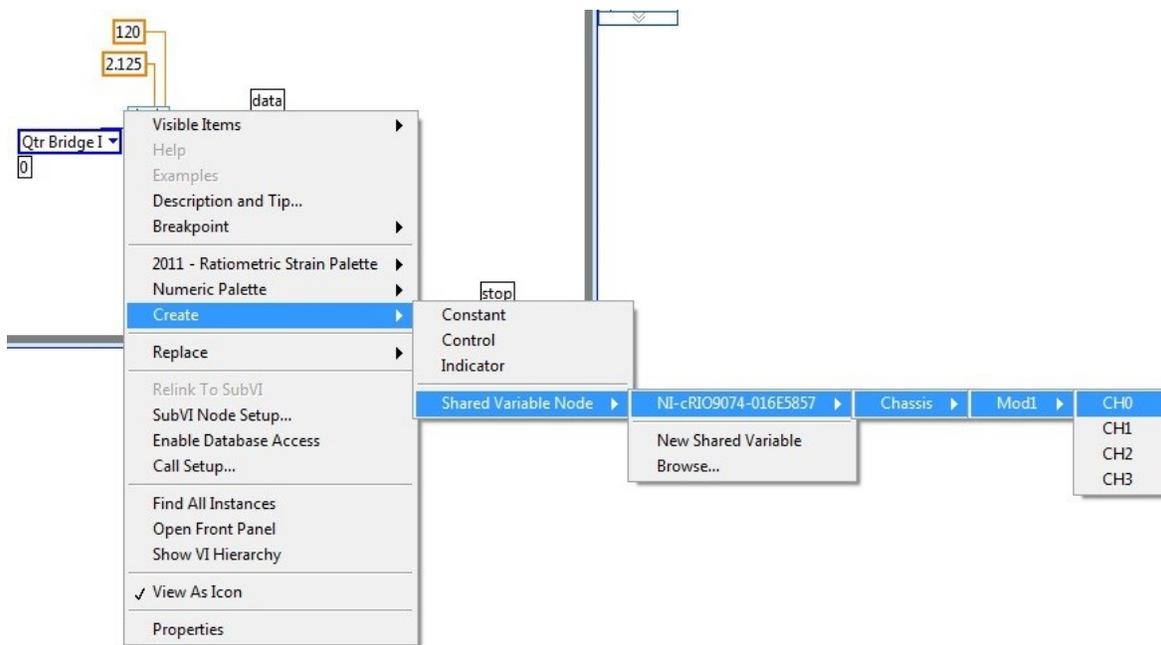


FIGURA B.11 Canal de comunicación entre el chasis y la computadora

Nótese que hay 4 canales que corresponden a los canales físicos en la tarjeta 9219, en caso de cablear otro que no sea el canal 0, seleccionar en este paso el canal correcto.

14. En la entrada de datos “Vinit” ubicada en la parte inferior del ícono de “Ratio Strain” hacer click derecho y seguir la misma ruta que en el paso anterior; en esta ocasión la nueva variable se arrastrará al exterior del ciclo del tiempo (figura B.12).

Este dato de entrada debe ingresar sólo una vez, ya que será el que calibre la medición y es por eso que va en la parte exterior del ciclo.

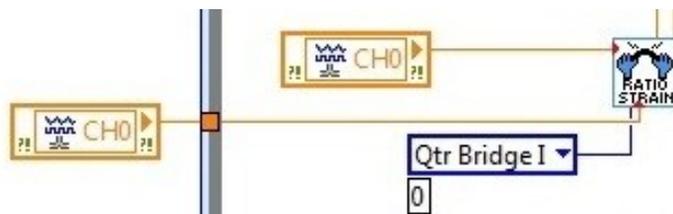


FIGURA B.12 Arrastrando el dato fuera del ciclo de tiempo

15. A continuación se deberán configurar las escalas de la gráfica que aparece en el panel frontal, para lo que se llevarán a cabo los siguientes pasos. Hacer click en botón derecho sobre la pantalla de la gráfica situada en el panel frontal y seleccionar “properties”.
16. Aparecerá la ventana de *Chart properties: data*, en ella se deberá seleccionar la pestaña de “scales” (escalas) y donde se modificarán algunos de los datos de ambos ejes. En el “X” se quita la selección del cuadro de “Autoscale” y los intervalos se seleccionan entre 0 y 1800, quedando el cuadro como en la figura B.13. Después se cambia al eje “Y” y se establecen los valores máximo y mínimo como 1m y -1m, respectivamente.

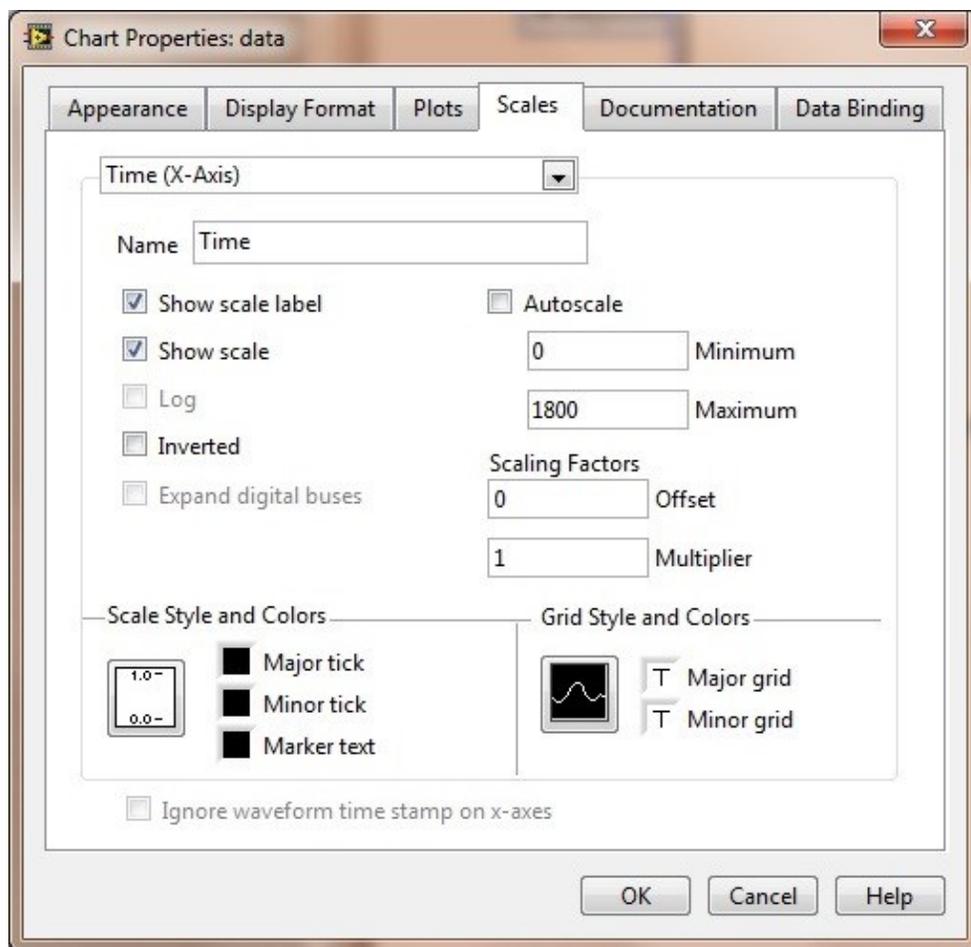


FIGURA B.13 Ventana emergente de las propiedades de la gráfica

Salvando datos en un archivo

- A. Localizar el ícono de "Write To Measurement File Express VI" dentro de la paleta de controles en "Output" y colocarlo sobre el diagrama de bloques debajo de "data" siguiendo la ruta Functions >> Output >> Write To Measurement File Express VI (figura B.14).

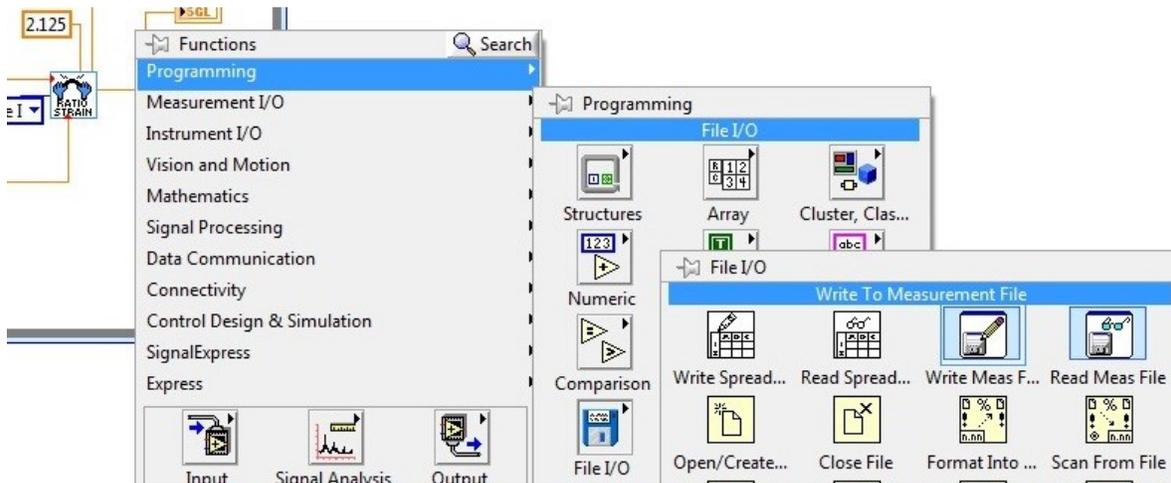


FIGURA B.14 Selección del ícono Write To Measurement File Express VI para almacenamiento de datos

El cuadro de diálogo "Configure Write To Measurement File Express VI" se abre por default. El cuadro de texto "File Name" despliega la dirección de salida del archivo; esta dirección se puede modificar para crear una ruta de fácil acceso. Cuando se requiera ver los datos en un procesador de textos, se sigue la dirección establecida anteriormente.

- B. En la sección "If a file already exists" del cuadro de diálogo "Configure Write To Measurement File", seleccionar la opción "Append to file" para guardar todos los datos en un nuevo archivo sin borrar los datos generados en un archivo antiguo.
- C. En la sección "Segment Headers", seleccionar la opción "One header only" para crear un solo encabezado en el archivo para el cual LabVIEW guarda todos los datos.
- D. Hacer click en el botón "Ok" para salvar la configuración actual y cerrar el cuadro de diálogo "Configure Write To Measurement File". La figura B.15 muestra la apariencia del asistente para el almacenamiento de datos.
- E. Realizar la conexión de flujo de datos sacando una ramificación del cable entre "Radiometric Convert" y "data", para conectar el *Write To Measurement File Express VI*, conectando la salida de datos "Strain" con la entrada de "signals".

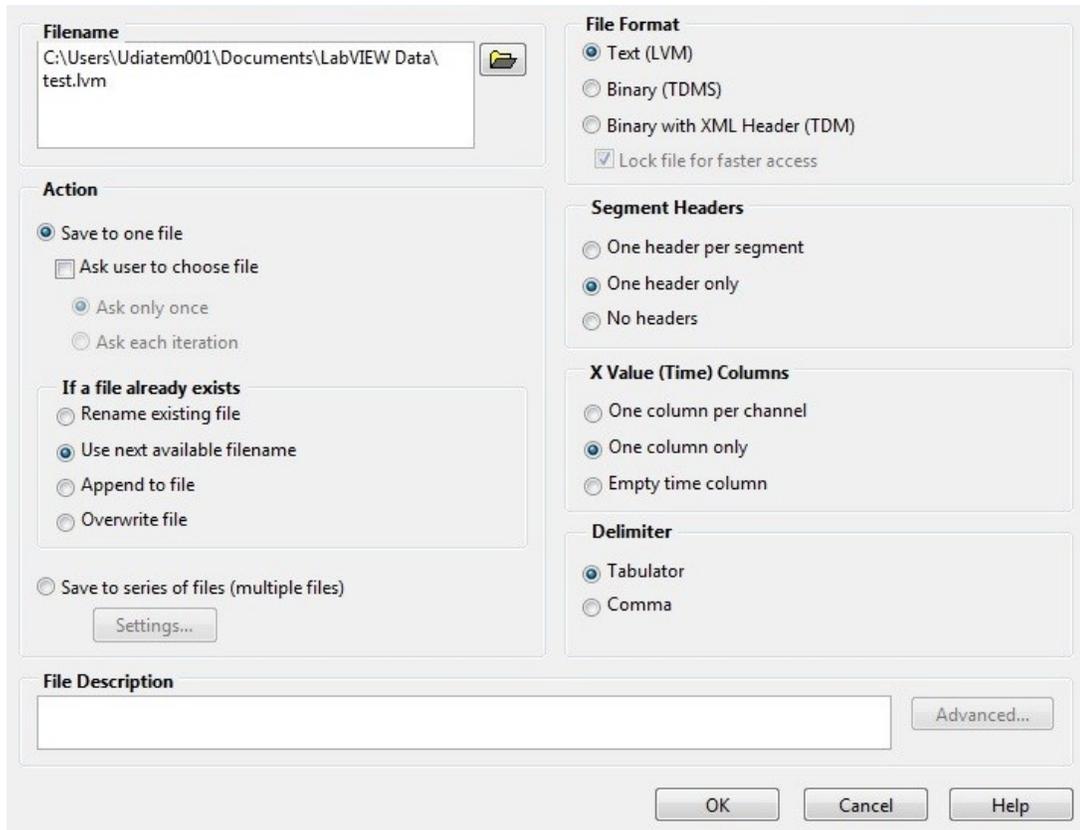


FIGURA B.15 Asistente para configurar el almacenamiento de datos

17. Posteriormente, cambiando a la ventana del explorador de proyecto y hacer click derecho sobre el módulo de la tarjeta 9219 y se selecciona “propiedades” (figura B.16).

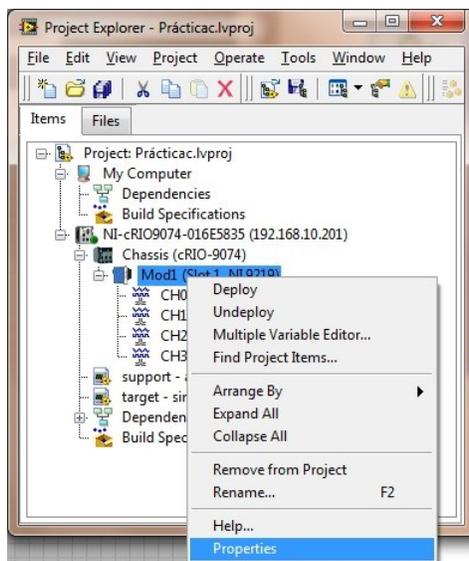


FIGURA B.16 Propiedades de la tarjeta 9219

18. Se despliega un cuadro de dialogo llamado “C Series Module Properties”, en el que se deberán ajustar los datos del canal que ya seleccionamos previamente. Haciendo click sobre el canal que se había seleccionado, se cambia en “Mode” por la opción de “Quarter-Bridge” y en “Range” se selecciona el valor de la resistencia que tenga la galga utilizada en el montaje.
19. Al final, la pantalla debe de tener una configuración similar a la de la figura B.17.

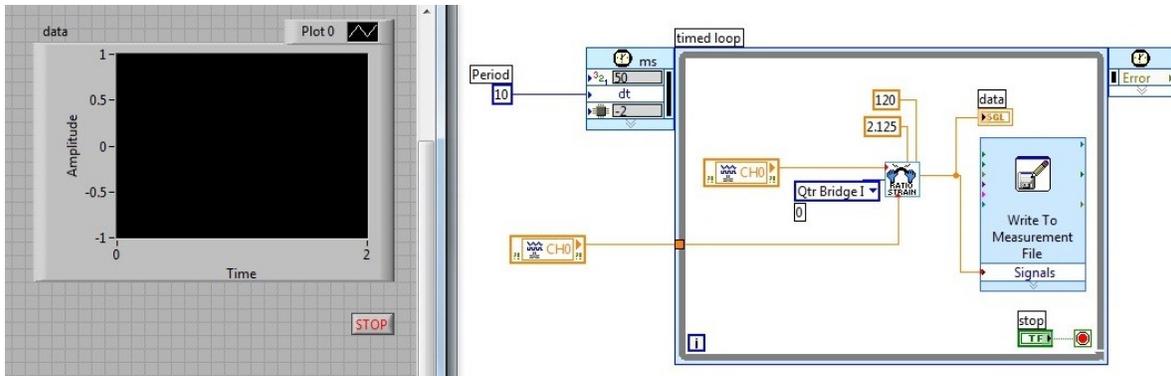


FIGURA B.17 Pantalla con el proyecto terminado

20. Guardar los cambios en el proyecto y el VI, y correr el programa para comenzar las mediciones.

En caso de querer utilizar más de un canal, el procedimiento será repetitivo, agregando tantos canales al VI como canales físicos existan en el chasis utilizado. A continuación se proporcionan los pasos necesarios.

Agregando más de un canal al proyecto

- I. Para agregar al proyecto más de un canal, se deben agregar más gráficas. En el panel frontal del VI, seleccionar el “Waveform chart” de la ruta; Controls>>Graph Indicators. Aparecerá en el diagrama de bloques un nuevo ícono llamado “Waveform Chart”, haciendo doble click sobre el mismo, se podrá cambiar su nombre, para este ejemplo se nombró “data 2”. Si sobre el mismo ícono se hace click derecho se podrá deshabilitar la opción “View as icon”, entonces su apariencia será igual a la de “data” (figura B.18).

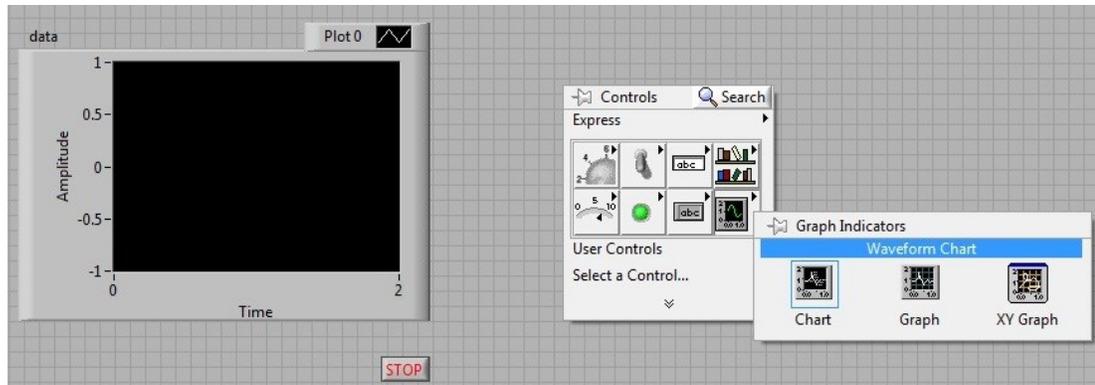


FIGURA B.18 Agregando una gráfica más para el segundo canal

- II. Una vez agregada la gráfica, se deberán seguir los pasos desde el 9 hasta el 16 para configurar el acondicionamiento de datos, pero en esta ocasión el canal que se seleccione del módulo en los pasos 13 y 14 será diferente, para este ejemplo se utilizaron los siguientes dos canales: “CH1 “ y “CH2”.
- III. Para guardar los datos del segundo canal en un archivo, no será necesario un nuevo “Write to a measurement file”, se utilizará un ícono que permite mezclar las señales de ambos canales. Seguir la ruta Functions >> Express >> Signal Manipulation y seleccionar “Merge Signals” (figura B.19).

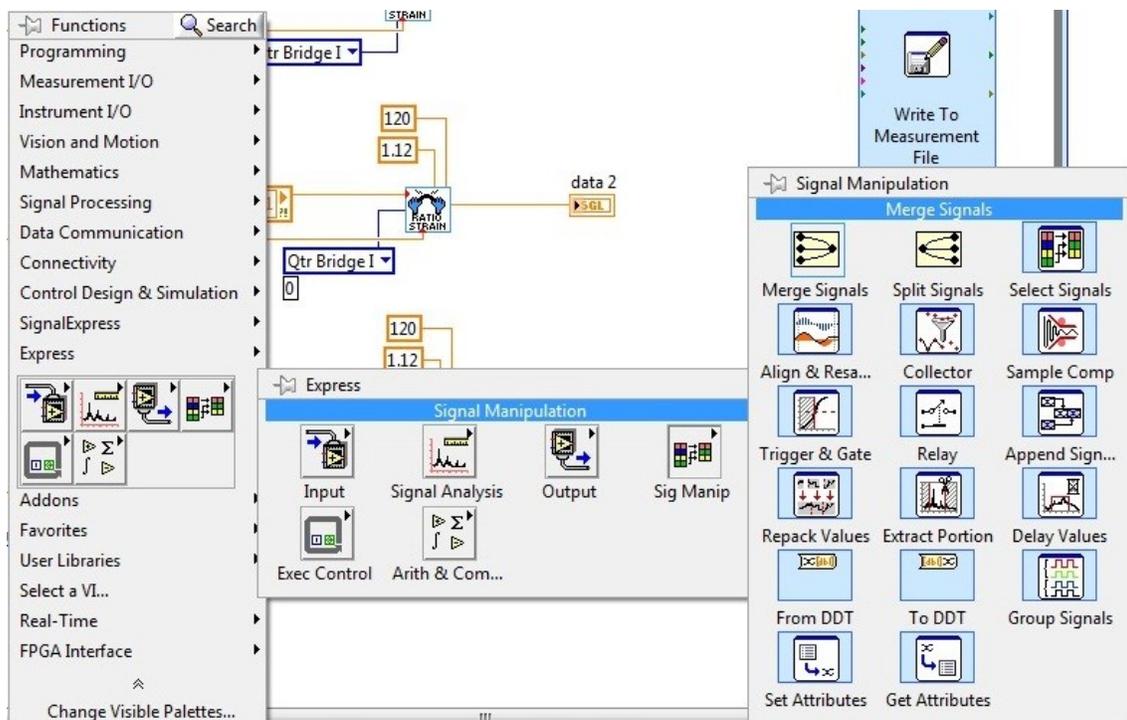


FIGURA B.19 Ruta para “Merge Signals”

- IV. Una vez que se tiene el ícono en la pantalla, se deberá eliminar la línea que conectaba “data” con el ícono de “Write to a measurement file”. Ahora se conecta “data” a una entrada del lado izquierdo con “Merge Signals” y otro cable desde la nueva gráfica hasta otra de las entradas de la izquierda. A su vez, se deberá conectar el lado derecho con “Write to a measurement file”, como se muestra en la figura B.20.

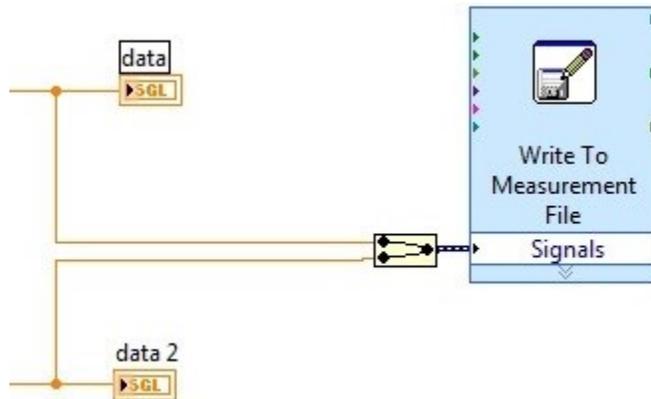


FIGURA B.20 Cableado para conectar más de una señal a un archivo de escritura

Nota: Si se usan más de dos gráficas, a partir del tercer cable que se conecte a “Merge Signals” deberá conectarse en cualesquiera de las dos entradas y el programa automáticamente configurará el ícono para tener más entradas, quedando el ícono como se muestra en la figura B.21.

- V. Finalmente, el programa deberá quedar completo, ya sea con uno o dos canales extra (figuras B.22 y B.23).
- VI. Guardar los cambios en el proyecto y el VI, y correr el programa para comenzar las mediciones.

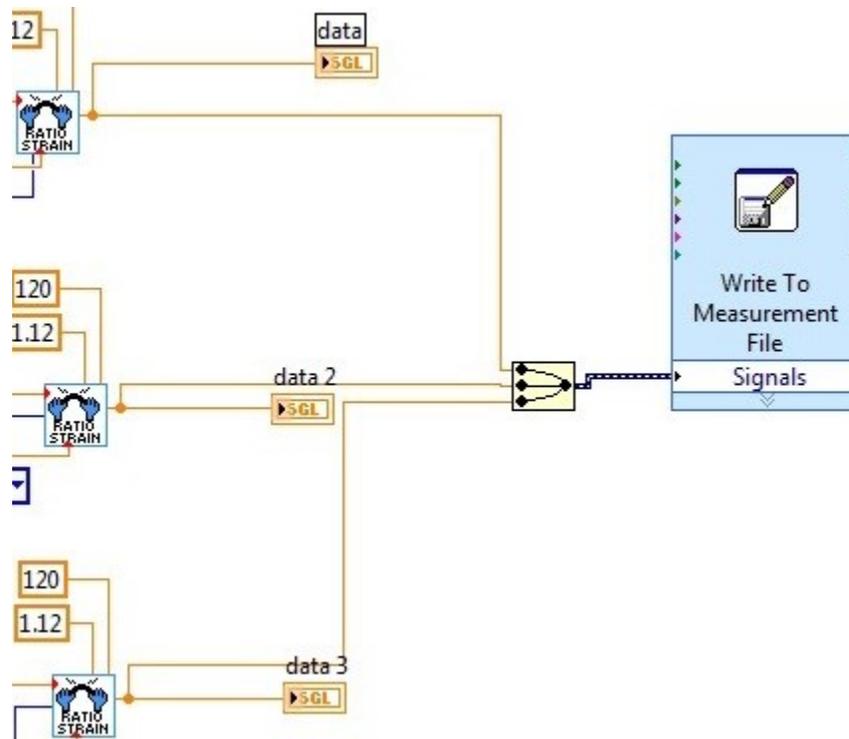


FIGURA B.21 Auto corrección del ícono de “Merge Signals” en LabVIEW

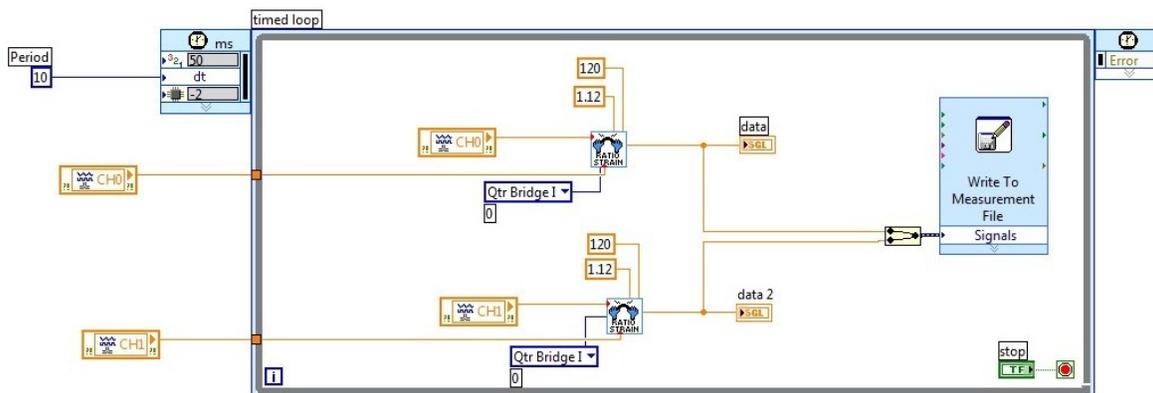


FIGURA B.22 Ejemplo de VI con dos canales para ensayos de flexión en viga plana con galga a compresión y galga a tracción

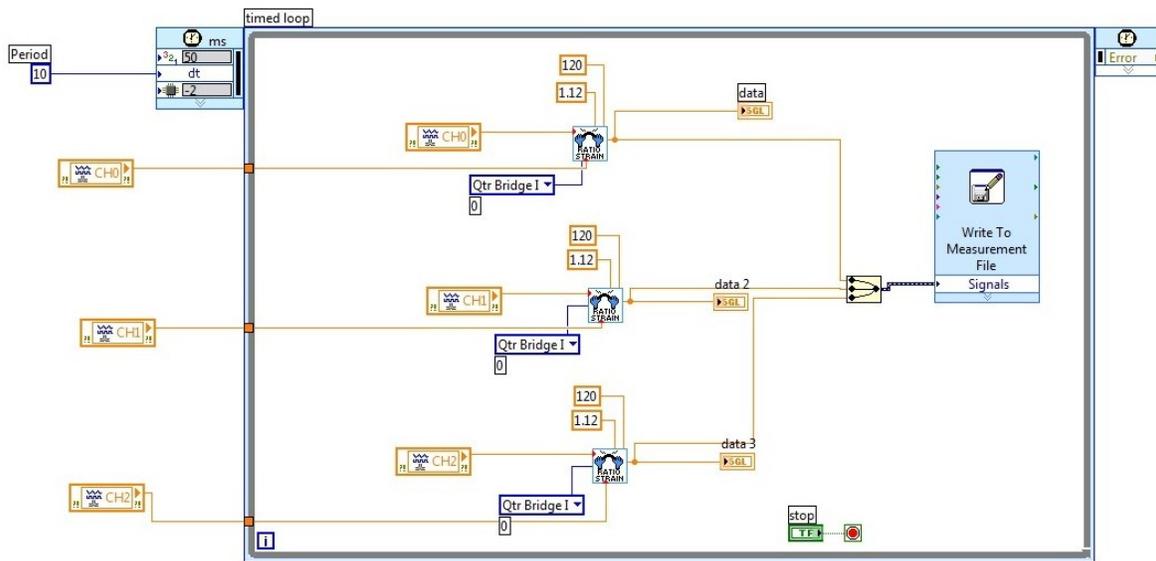


FIGURA B.23 Ejemplo de VI con tres canales para rosetas de torsión

Referencia

1. <http://www.ni.com/labview/technical-resources/> , Abril 2016.