

STRAIN GAGES.

FUNDAMENTOS Y APLICACIONES EN RESISTENCIA DE MATERIALES

John Alejandro Forero Casallas
Ingeniero Mecánico, Especialista en Automatización Industrial. Departamento de Investigación
Facultad de Ingeniería, Universidad Libre de Colombia

RESUMEN

A lo largo del avance tecnológico en países desarrollados y aún en países en vía de desarrollo, el estudio de las deformaciones en Ingeniería ha sido fundamental para el diseño de mecanismos, estructuras y máquinas; y uno de los elementos más utilizados para tal fin es el deformímetro eléctrico, galga extensiométrica o *strain gages*.

PALABRAS CLAVE

Deformímetros eléctricos, Galgas extensiométricas, Medición de esfuerzos, Puente de Wheatstone, Resistencia de materiales.

ABSTRACT

Throughout the technological advance in developed countries and still in countries in via of development, the study of the deformations in engineering has been fundamental for the design of mechanisms, structures and machines; and one of the used elements more for such aim is the strain gages.

KEY WORDS

Resistant materials, Strain gages, Stress measuring, Wheatstone bridge.

1. RESEÑA HISTÓRICA

En 1856 el profesor William Thomson (Lord Kelvin) presentó a la "Royal Philosophical Society of London" los resultados de sus experimentos en los cuales demostraba que la resistencia de alambre de hierro y cobre variaban por deformación; para ello utilizó el puente de Wheatstone.

En 1922, Mc.Collum y Peters idearon un deformímetro de discos de carbón, bajo compresión inicial; variaciones de presión entre los discos causaron un cambio en su resistencia.

En 1931, Carlson desarrolló el primer deformímetro de resistencia, el cual, con una fuerza de una libra presentaba una deformación de 0,0005 pulgadas.

En 1938, independientemente y casi al mismo tiempo, fue perfeccionado el deformímetro de resistencia

Fecha de recepción del artículo: 7 de febrero de 2006.
Fecha de aceptación del artículo: 19 de abril de 2006.

eléctrica por dos hombres trabajando en laboratorios ampliamente separados.

Simmons en el *California Institute of Technology*, y Ruge en el *Massachusetts Institute of Technology* desarrollaron técnicas para adherir una longitud de fino alambre a la superficie investigada, de forma tal que las deformaciones en la superficie eran transmitidas directamente al alambre.

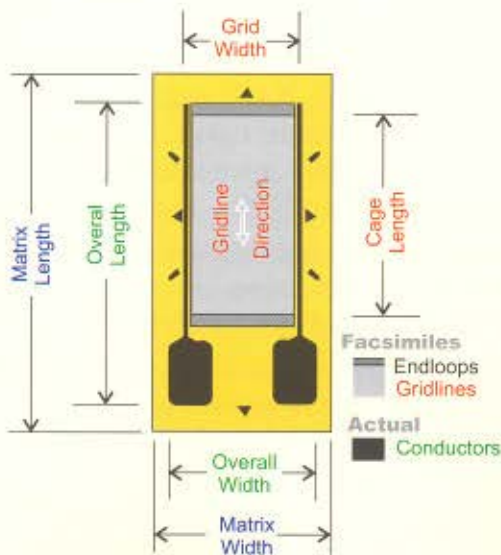
Aunque Simmons recibió oficialmente el crédito por el invento, la primera empresa que los manufacturó y los vendió (la *Baldwin-Lima-Hamilton Corporation*) tomó la referencia SR.4 donde incorpora las iniciales de ambos nombres para referirse a los deformímetros o *strain gages*.

Desde entonces estos medidores de deformación han sido usados ampliamente en la industria automotriz, locomotriz, puentes, edificios, máquinas, herramientas y en la industria aeroespacial. Estas aplicaciones son apenas algunos usos posibles de los *strain gages* y falta mencionar su uso como unidad de percepción en fluidos a presión, torquímetros, comparadores, acelerómetros, celdas de carga y otros instrumentos.

2. CARACTERÍSTICAS DIMENSIONALES DE LOS STRAIN GAGES

En la figura 1 se presentan las características dimensionales de un *strain gages*. Éste es un ejemplo

Figura 1. Características dimensionales de un *strain gages*



suministrado por catálogos de la firma Measurement Group.

Los parámetros dimensionales a tener en cuenta son: ancho de la rejilla (*Grid Width*), ancho total del deformímetro (*Overall Width*), longitud de deformímetro • longitud de galga (*Gage Length*), longitud total del deformímetro (*Overall Length*), longitud del deformímetro incluyendo el soporte (*Matrix Length*), ancho del deformímetro incluyendo el soporte (*Matrix Length*).

Adicionalmente, se diferencia la parte que capta la deformación (*Gridlines*) de la que no; ésta última corresponde a los extremos de la rejilla (*Endloops*) y a los puntos de conexión (*conductors*); además se observa que la dirección en la cual capta la deformación es la dirección axial del deformímetro y en esa dirección es hacia donde está orientada la rejilla (*Gridline Direction*).

3. PARÁMETROS CARACTERÍSTICOS DE LOS STRAIN GAGES

Los parámetros característicos de los deformímetros son: el material del alambre, el factor de galga, el material del soporte, el pegante de fijación, la serie, la longitud y el modelo. A continuación se hace una breve explicación de cada uno de estos parámetros.

3.1 Material del alambre

El componente principal que determina las características de funcionamiento de un deformímetro es la aleación sensible a la deformación usada en la rejilla. El material del alambre del deformímetro debe cumplir las siguientes características: alta resistividad, baja sensibilidad a la temperatura, alta estabilidad eléctrica, elevado punto de fluencia, elevado límite de fatiga, buena soldabilidad, baja histéresis, buena resistencia a la corrosión. El material más usado es el Constantan, que es una aleación de Níquel y Cobre; también se utilizan las aleaciones Isoelástico y Karma para otras aplicaciones. Estas aleaciones se explican brevemente a continuación.

Aleación Constantan. De todas las aleaciones modernas para deformímetros, el constantan es la más antigua, y aún la más usada; esto se debe a que tiene la mejor combinación de características necesarias para muchas aplicaciones; por ejemplo, esta aleación presenta una sensibilidad alta a la

deformación o factor de galga, además es relativamente insensible a la temperatura, su resistencia alcanza valores convenientes y su coeficiente de expansión térmica no es muy alto.

Aleación Karma. Ésta es una aleación de Níquel con 20% de Cromo, 3% de Aluminio y 3% de Hierro. Se caracteriza por una alta resistencia a la fatiga y excelente estabilidad en la medida; se usa para medidas estáticas de deformación en períodos largos de tiempo (meses o años) a temperatura ambiente, o en períodos cortos a altas temperaturas. También se utiliza a temperaturas muy bajas.

Aleación Isoelástico. Esta es una aleación de Hierro con 36% de Níquel, 8% de Aluminio, 4% de Manganeso-Silicio-Vanadio y 0.5% de Molibdeno. Se utiliza cuando las medidas son puramente dinámicas, es decir cuando no es necesario mantener una referencia estable en cero. Tiene una alta vida a la fatiga, así como un alto factor de galga (aproximadamente 3,2) y además es resistente a campos magnéticos.

3.2 Factor de galga

Se suele designar como F o GF . Es un valor que indica la sensibilidad del deformímetro y corresponde a la relación:

$$\frac{dR/R}{dL/L}$$

donde R es la resistencia eléctrica inicial del deformímetro y dL/L es la deformación unitaria ϵ_0 en la dirección axial. Este valor está relacionado con el material del alambre de la galga. Los valores para los diferentes materiales son, aproximadamente, los siguientes: Constantan (2,00-2,05), Karma (2,1) e Isoelástico (3,2).

3.3 Material del soporte del deformímetro

El deformímetro se fija entre láminas soporte que cumplen con funciones como: proporcionar el medio para manipular la galga durante su instalación, proporcionar una superficie fácilmente adherible para la fijación en el elemento de prueba, proporcionar el aislante eléctrico entre la grilla de metal y el elemento de prueba.

El material que sirve de soporte de la grilla debe cumplir ciertas condiciones para que se transmitan las deformaciones del material ensayado al deformímetro, estas condiciones son: mínimo espesor

consistente, resistencia mecánica elevada, resistencia dieléctrica elevada, buena adherencia al pegante usado, no higroscópico. Los fabricantes suministran deformímetros eléctricos con soportes hechos de papel, poliamida y resina epoxi-fenólica.

Poliamida. Este material para el soporte es resistente y extremadamente flexible, además se puede contornear fácilmente para ser instalado en espacios pequeños. Se puede utilizar en un rango de temperaturas de $-195\text{ }^{\circ}\text{C}$ a $175\text{ }^{\circ}\text{C}$ ($-320\text{ }^{\circ}\text{F}$ a $350\text{ }^{\circ}\text{F}$), además es ideal para propósitos generales de análisis estático y dinámico, y también permite elongaciones grandes. Se puede utilizar para medir deformaciones en el rango plástico con un exceso del 20%.

Resina Epoxi-fenólica. Se utiliza para una gama más amplia de temperaturas. Este material de soporte se puede usar para mediciones de deformaciones estáticas y dinámicas con temperaturas que van desde $-269\text{ }^{\circ}\text{C}$ a $290\text{ }^{\circ}\text{C}$ ($-452\text{ }^{\circ}\text{F}$ a $550\text{ }^{\circ}\text{F}$). Para períodos cortos de aplicación, el límite superior de temperatura se puede ampliar hasta $400\text{ }^{\circ}\text{C}$ ($750\text{ }^{\circ}\text{F}$). La elongación máxima de este soporte es limitada, sin embargo, está entre el 1% y el 2%.

3.4 Pegante para fijar el deformímetro

Las condiciones que debe cumplir el pegante para que se transmitan de manera adecuada las deformaciones que se presentan en el elemento de prueba son: elevada resistencia mecánica, elevada resistencia al creep, elevada resistencia dieléctrica, buena adherencia, mínima absorción de humedad, fácil aplicación, fraguado rápido.

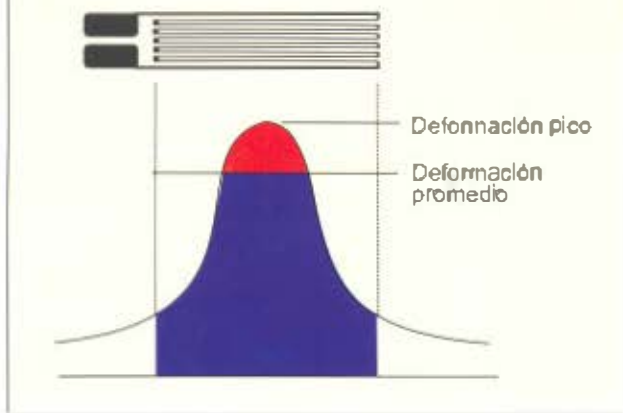
3.5 Serie del deformímetro

Las dos características anteriores, material del alambre y del soporte del deformímetro, junto con otras características de diseño como son: el pegante requerido para la instalación, forma de los puntos de cobre dispuestos para soldar los cables de conexión, etc., determinan la serie del deformímetro, la cual se debe seleccionar adecuadamente para una determinada aplicación.

3.6 Longitud del deformímetro (Gage length)

La longitud del deformímetro se refiere a la longitud activa, es decir, esa parte del deformímetro que es sensible a deformación. Los terminales de cobre y las partes extremas de la grilla son insensibles a la

Figura 2. Deformación promedio de un deformímetro eléctrico



deformación debido a su área transversal relativamente grande y resistencia eléctrica baja.

3.7 Deformación promedio

La galga de deformación tiende a integrar o hacer un promedio de las deformaciones que se presentan a lo largo de toda la grilla (Figura 2). además la zona media de la galga es más sensible y allí es donde se concentra la medición de la deformación, por lo tanto se puede decir que la deformación que capta el deformímetro es la correspondiente al punto medio de él.

3.8 Modelo del deformímetro

El modelo del deformímetro se refiere básicamente a su configuración, el tipo de construcción y la orientación de las grillas. En cuanto a la configuración los deformímetros (Figura 3) pueden ser uniaxiales, biaxiales o triaxiales.

En cuanto al tipo de construcción (Figura 4), se dividen en: Planas y Superpuestas.

Las ventajas de la configuración plana sobre la superpuesta son: mayor flexibilidad, se puede adherir

Figura 3. Deformímetros uniaxial, biaxial y triaxial

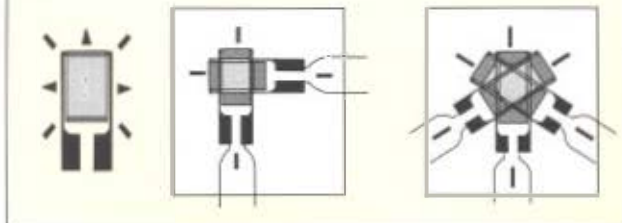
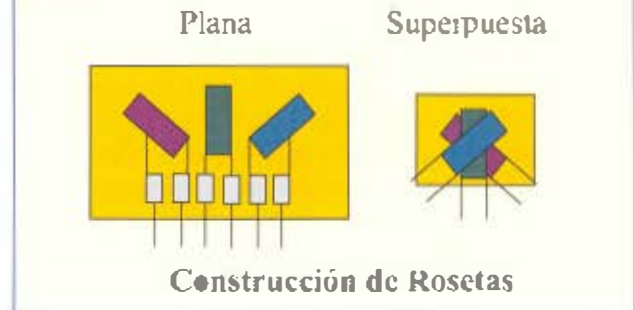


Figura 4. Tipos de construcción del deformímetros



más fácil en superficies curvas, disipa mejor el calor, mayor estabilidad, mayor facilidad de instalación ya que hay más espacio para los cables de conexión.

Las ventajas de la configuración superpuesta son: menor área superficial por lo tanto es útil en espacios reducidos, toma la deformación en un punto específico, no hay problema si hay variación apreciable de la deformación alrededor del punto, las propiedades de los deformímetros en el arreglo son iguales, mientras que la configuración plana tiene leves desviaciones en sus características que pueden dar lugar a errores.

3.9 Selección del deformímetro

Los fabricantes de deformímetros como HBM, Kyowa, Measurements Group o Texas Measurements, ofrecen una gran variedad de deformímetros eléctricos para una gama amplia de necesidades. A pesar del gran número de variables que intervienen en las propiedades del deformímetro, el proceso de selección de éste se reduce a unos pasos básicos como son: longitud, modelo, serie, resistencia, número S-T-C.

Longitud del deformímetro. De los parámetros anteriores la longitud y el modelo del deformímetro son respectivamente lo primero y lo segundo que se selecciona, basado en el espacio disponible para el montaje y la naturaleza del campo de deformaciones. Un punto de partida aceptable para la consideración inicial de la longitud del deformímetro es 3 mm. Este tamaño ofrece la variedad más amplia de opciones de todos los parámetros restantes como el modelo, la serie y la resistencia. Las razones principales para seleccionar un deformímetro más grande son: Área de la grilla más grande para mejor disipación de calor, mejor estimación de la deformación en materiales no homogéneos como compuestos reforzados con fibra

o concreto. manejo ligeramente más fácil e igualmente más fácil procedimiento de instalación (para longitudes de deformímetros de 13 mm).

Por otro lado una longitud más corta del deformímetro puede ser necesaria cuando el objeto es medir deformaciones localizadas máximas en los alrededores de una concentración de esfuerzo, al igual que cuando el espacio disponible para el montaje es muy limitado.

Modelo del deformímetro. Al seleccionar el modelo, la primera consideración es saber si se requiere una sola grilla (deformímetro uniaxial) o grilla múltiple (roseta). Los deformímetros uniaxiales, al igual que las rosetas de dos direcciones (rosetas de 90 grados) están disponibles en diferentes proporciones de longitud-anchura y variedad de arreglos para soldar los alambres, todo esto se adapta a las diferentes exigencias de instalación. Con rosetas de tres direcciones (rectangular o delta), la consideración en la selección del modelo una vez se ha determinado la longitud del deformímetro, es determinar si se requiere tipo de construcción plana o superpuesta.

Serie del deformímetro. Los fabricantes utilizan letras que llaman serie para identificar algunas características del deformímetro. La serie del deformímetro combina algunos rasgos de construcción como son: el tipo de aleación del cual está hecho el deformímetro, el material de soporte, la extensión para adherir los alambres de conexión, etc. La combinación de las diferentes características de diseño determina la serie del deformímetro.

Resistencia del deformímetro. Se determina si se quieren usar deformímetros de 120 ohm, 350 ohm, 700 ohm y 1000 ohm; esto depende de la instrumentación que se tenga y de las características de operación. Los valores de resistencia más comunes son 120 ohm y 350 ohm.

Número S-T-C. Este valor significa auto-compensación de temperatura (self-temperature-compensation) y este número es el coeficiente de expansión térmica aproximado del material de ensayo en el cual la galga presenta una deformación mínima aparente por temperatura. En algunos casos el coeficiente de expansión térmica es un parámetro crítico que se debe seleccionar adecuadamente y se debe tener en cuenta que debe ser semejante al del material base para que no haya descompensación en sus respectivas deformaciones. Generalmente los fabricantes suministran este valor en unidades de $10^5/^\circ\text{C}$ o $\text{ppm}/^\circ\text{F}$.

4. OPERACIÓN DE LOS STRAIN GAGES

4.1 Fundamentos de operación

Asumiendo una longitud inicial de L , del conductor, con un área transversal CD^2 , siendo D la dimensión de la sección y C una constante de geometría ($C = \rho/4$) para el círculo). Si el conductor está deformado axialmente por tensión, se presentará un aumento en longitud y una disminución transversal en función de la relación de Poisson; por tanto la resistencia será inicialmente:

$$R = \frac{\rho L}{CD^2} \quad (1)$$

Al aumentar L y disminuir D , aumenta R y derivando la ecuación (1) con respecto a D , L y ρ se tiene:

$$dR = \frac{CD^2(\rho dL + Ld\rho) - 2C\rho LDdD}{(CD^2)^2} \quad (2)$$

Dividiendo (2) entre (1) se tiene:

$$\frac{dR}{R} = \frac{dL}{L} + \frac{d\rho}{\rho} - \frac{2dD}{D} \quad (3)$$

Dividiendo (3) por dL/L :

$$\frac{dR/R}{dL/L} = 1 + \frac{d\rho/\rho}{dL/L} - \frac{2dD/D}{dL/L} \quad (4)$$

Puesto que $dL/L = \epsilon_a$, es la deformación unitaria axial y $dD/D = \epsilon_r$, es la deformación unitaria transversal o radial, además:

$$-\frac{\epsilon_r}{\epsilon_a} = \nu = -\frac{dD/D}{dL/L} \quad (5)$$

es la relación de Poisson, entonces se tiene que:

$$\frac{dR/R}{\epsilon_a} = 1 + \frac{d\rho/\rho}{\epsilon_a} + 2\nu \quad (6)$$

La relación $\frac{dR/R}{\epsilon_a}$ se llama factor de deformímetro o **factor de galga** y se denota con la letra F o GF , por tanto:

$$F = \frac{dR/R}{\epsilon_a} = 1 + 2\nu + \frac{d\rho/\rho}{\epsilon_a} \quad (7)$$

Normalmente, la resistividad no cambia por deformación y fácilmente se podrá calcular el valor de F , pues ν se encuentra tabulado; generalmente oscila entre 0.25 y 0.4; para deformímetros metálicos F es aproximadamente igual a 2.

La relación fundamental para deformímetros es por tanto,

$$F\varepsilon_n = \frac{dR}{R} \quad (8)$$

En la práctica los valores de F y R los da el fabricante y el experimentador determina sólo dR , correspondiente a la situación que se está estudiando.

5. CIRCUITOS ELÉCTRICOS PARA DEFORMÍMETROS

El siguiente análisis demuestra la alta sensibilidad, y por tanto la confiabilidad y versatilidad de los deformímetros.

De la relación básica (8), se tiene:

$$\varepsilon = \frac{1}{F} \frac{dR_g}{R_g} \quad (9)$$

donde R_g es la resistencia del deformímetro. Son muy usuales los siguientes valores para deformímetros eléctricos:

$$R_g = 120 \Omega$$

$$F = 2.0$$

Se debe tener en cuenta que la unidad de medición es la microdeformación y que equivale a:

De acuerdo con lo anterior, deformaciones de 1me son detectadas en el deformímetro con una variación de su resistencia igual a:

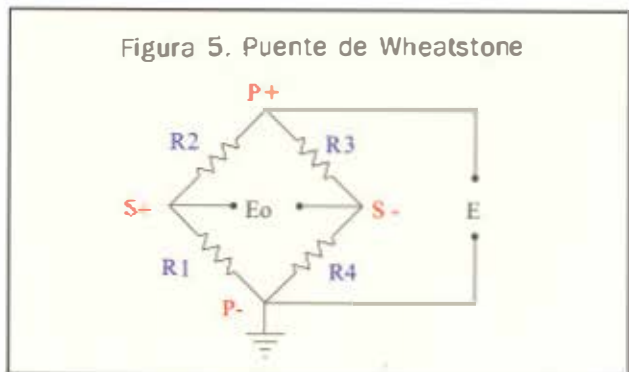
$$dR = FR_g\varepsilon = 2(120)(10^{-6}) = 0.00024$$

que en porcentaje de R_g será $2 \times 10^{-4}\%$.

Es natural que para medir variaciones tan pequeñas se requiere un óhmetro altamente sensitivo; por tanto para tal propósito, el circuito que más se emplea es el Punte de Wheatstone.

Circuito de puente de Wheatstone

Generalidades. Este arreglo eléctrico fue inventado por S.H. Christie en 1833, y llamado el Punte de Wheatstone (*Wheatstone Bridge*) en honor a Sir Charles Wheatstone, quien fue el primero en darle un uso significativo. Este sistema es uno de los más convenientes y precisos métodos en la medición de resistencias.



Para el circuito mostrado en la figura 5, conocido como puente de Wheatstone, en el que E es el voltaje suministrado por la fuente de excitación y E_o la diferencia de potencial existente entre los puntos $S+$ y $S-$, se tienen las siguientes ecuaciones para las caídas de potencial en función de las resistencias y corrientes correspondientes:

$$\begin{aligned} E &= i_1 (R_1 + R_2) \\ E &= i_2 (R_3 + R_4) \end{aligned} \quad (10)$$

Luego las corrientes en cada rama son:

$$\begin{aligned} i_1 &= \frac{E}{R_1 + R_2} \\ i_2 &= \frac{E}{R_3 + R_4} \end{aligned} \quad (11)$$

Las caídas de potencial E_1 y E_2 sobre las resistencias R_1 y R_4 , respectivamente, son:

$$\begin{aligned} E_1 &= i_1 R_1 = E \frac{R_1}{R_1 + R_2} \\ E_2 &= i_2 R_4 = E \frac{R_4}{R_3 + R_4} \end{aligned} \quad (12)$$

Por tanto, la diferencia de potencial entre $S+$ y $S-$ es:

$$E_o = E_1 - E_2$$

$$E_o = E \left(\frac{R_1}{R_1 + R_2} - \frac{R_4}{R_3 + R_4} \right) \quad (13)$$

Se tiene compensado o equilibrado el puente cuando en un galvanómetro, colocado entre S+ y S-, no se registra el paso de corriente, o sea la diferencia de potencial es nula entre dichos puntos; por tanto se tendrá equilibrado el puente cuando:

$$E_o = E \left(\frac{R_1}{R_1 + R_2} - \frac{R_4}{R_3 + R_4} \right) = 0$$

$$\frac{R_1(R_3 + R_4) - R_4(R_1 + R_2)}{(R_1 + R_2)(R_3 + R_4)} = 0$$

$$\frac{R_1 R_3 - R_2 R_4}{(R_1 + R_2)(R_3 + R_4)} = 0 \quad (14)$$

$$R_1 R_3 = R_2 R_4$$

Cuando no hay flujo de corriente por el galvanómetro, entonces: R_1 es a R_2 como R_3 es a R_4 .

$$R_1/R_2 = R_3/R_4$$

$$R_1 = (R_3/R_4) \times R_2$$

Para el caso en que las resistencias sean iguales se cumple que el puente está equilibrado:

$$R_1 = R_2 = R_3 = R_4 = R$$

Aplicación en deformímetros. El puente de Wheatstone es útil para usarse en deformímetros porque puede ajustarse fácilmente a cero para cero deformaciones, y presenta facilidad para reducir o eliminar efectos de la temperatura.

En el caso real de los deformímetros hay pequeñas variaciones entre cada uno de ellos, pero mediante un reóstato incorporado al circuito se hace el equilibrio para cuando no hay deformación inicial o cuando se requiere dar una predeformación. Ver Figura 6.

En el caso general, cuando se produce una deformación en los deformímetros, las resistencias varían:

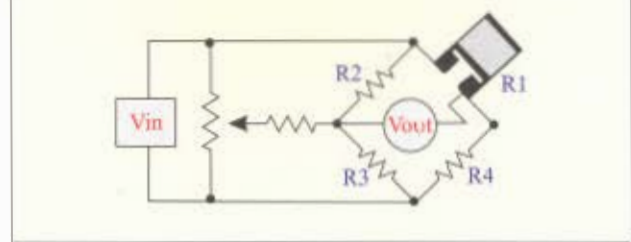
$$R_1 = R + dR_1$$

$$R_2 = R + dR_2$$

$$R_3 = R + dR_3$$

$$R_4 = R + dR_4$$

Figura 6. Balance de Puente de Wheatstone



De la fórmula (13) se tiene:

$$\frac{E_o}{E} = \frac{R_1}{R_1 + R_2} - \frac{R_4}{R_3 + R_4} \quad (15)$$

$$\frac{E_o}{E} = \frac{R + dR_1}{2R + dR_1 + dR_2} - \frac{R + dR_4}{2R + dR_3 + dR_4} \quad (16)$$

Desarrollando y agrupando y simplificando se obtiene:

$$\frac{E_o}{E} = \frac{dR_1 - dR_2 + dR_3 - dR_4}{4R + 2dR_1 + 2dR_2 + 2dR_3 + 2dR_4} \quad (17)$$

De la anterior fórmula se concluye que se suman los efectos de los deformímetros enfrentados y se anulan los efectos de los deformímetros adyacentes.

Si se divide la ecuación por R en el numerador y denominador, y se reemplaza dR/R por $F\varepsilon$ se obtiene:

$$\frac{E_o}{E} = \frac{F(\varepsilon_1 - \varepsilon_2 + \varepsilon_3 - \varepsilon_4)}{4 + 2F\varepsilon_1 + 2F\varepsilon_2 + 2F\varepsilon_3 + 2F\varepsilon_4} \quad (18)$$

Dependiendo de la ubicación y el número de deformímetros en el puente de Wheatstone la salida puede ser lineal o no. Cuando se tienen deformaciones pequeñas (alrededor de 1000 microdeformaciones) se puede considerar que la salida es completamente lineal, entonces la ecuación quedaría:

$$\frac{E_o}{E} = \frac{F(\varepsilon_1 - \varepsilon_2 + \varepsilon_3 - \varepsilon_4)}{4} \quad (19)$$

Conexión de medio puente. La conexión de medio puente permite el uso de más de un deformímetro para la medición de deformaciones, especialmente si hay una relación conocida entre dos deformaciones, como en el caso de flexión, donde se sabe que las deformaciones por tensión y compresión son iguales pero de diferente sentido, a igual distancia del eje neutro. En este caso se pueden usar ambos deformímetros, compensándose al mismo tiempo el efecto de la temperatura.

Figura 7. Conexión de medio puente

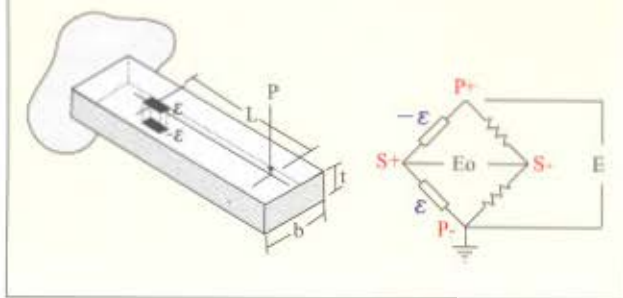
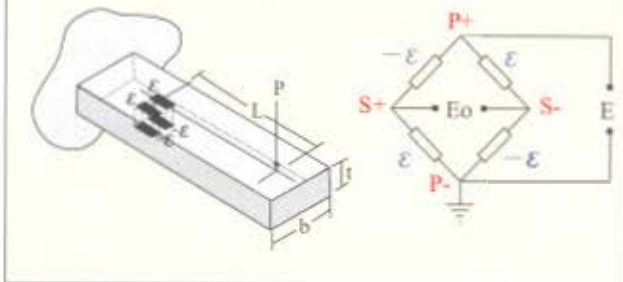


Figura 8. Conexión de puente completo



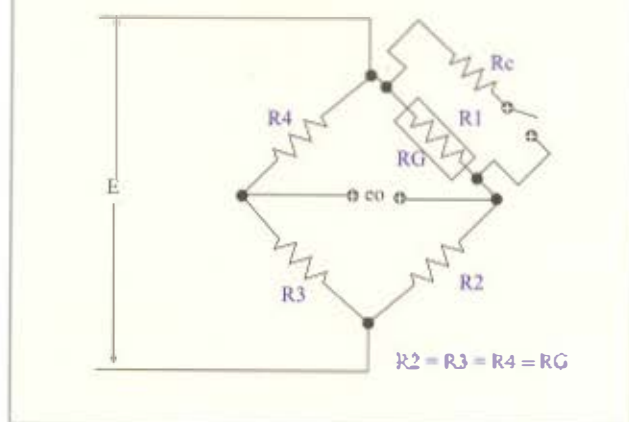
En la figura 7 se indica esquemáticamente la conexión de medio puente. Se observa que el deformímetro ubicado en la parte superior de la viga en voladizo se encuentra sometido a tracción, mientras el que se encuentra en la parte inferior está sometido a compresión, sus deformaciones son de signo contrario, y por estar en lados adyacentes del puente sus efectos se suman.

Conexión de puente completo. Si se ubica un deformímetro en cada rama del puente de Wheatstone se dice que hay configuración de puente completo y la salida de voltaje será mayor que cuando se usa una configuración de un cuarto o de medio puente.

Para realizar esta conexión es necesario colocar en lados opuestos los deformímetros sometidos a la misma condición de carga, sea tracción o compresión. En la Figura 8, se muestra un elemento sometido a flexión que tiene ubicados cuatro deformímetros. también se muestra la ubicación de éstos en el circuito puente.

Calibración. Sabiendo el factor de galga (F) y la resistencia (R) de un deformímetro se facilita un método simple para calibrar un sistema de deformímetros; consiste en determinar la respuesta del sistema a la introducción de un pequeño cambio, conocido de resistencia y calcular así la deformación equivalente a ese cambio de resistencia. En paralelo con el deformímetro de resistencia R_1 , se hace el

Figura 9. Calibración del circuito de puente



montaje de una resistencia de alta confiabilidad en su valor conocido R_c , unida a un interruptor, para formar el circuito mostrado en la Figura 9.

inicialmente se tiene sólo la resistencia del deformímetro, por lo tanto,

$$R = R_1 = R_G$$

pero al cerrar el interruptor, las resistencias quedan en paralelo, o sea,

$$R = \frac{R_G R_c}{R_G + R_c}$$

la variación de la resistencia será:

$$dR = R_G - \frac{R_G R_c}{R_G + R_c} = \frac{R_G^2}{R_G + R_c}$$

para determinar la deformación equivalente se tiene que:

$$\varepsilon = \frac{1}{F} * \frac{dR_G}{R_G}$$

Sustituyendo se tiene:

$$\varepsilon_{eq} = \frac{1}{F} * \frac{R_G}{R_G + R_c} \quad (20)$$

Esta es la ecuación fundamental de calibración: por ejemplo si se tiene una resistencia de calibración de 59.880 ohmios en paralelo con un deformímetro de 120 ohmios y un factor de galga de 2,0, se simularán 1000 microdeformaciones.

El anterior es un método de laboratorio muy útil en el caso de emplear un aparato medidor del desbalanceo

del puente, que no esté calibrado o se dude de su confiabilidad. La deformación equivalente calculada, producto del cambio de resistencia eléctrica, es el patrón de calibración para la respuesta del indicador.

6. CONSTANTE DE PUENTE

Para seguir una nomenclatura más práctica en el estudio de la constante de puente, se denotará por R_1 y R_3 los deformímetros sometidos a tracción, y por R_2 y R_4 los sometidos a compresión, que así mismo presentan deformaciones $\epsilon_1, \epsilon_2, \epsilon_3$ y ϵ_4 respectivamente. Para este análisis se toma como referencia la Figura 5.

La constante de puente se define por la ecuación:

$$S = \frac{A}{B} \quad (21)$$

Donde:

S: Constante de puente.

A: Señal dada por el puente según el número y colocación de los deformímetros.

B: Señal del puente cuando sólo se utiliza un deformímetro.

La constante de puente determina el factor de amplificación de la salida. Es decir, dependiendo del número y posición de los deformímetros en el puente, se puede tener una mayor sensibilidad de la lectura.

6.1 Constante de puente para cargas de tracción

Un deformímetro a tracción. Para conocer la señal de salida del puente se aplica la ecuación (21), en la que sólo hay variación del deformímetro R_1 , es decir, se tiene una deformación ϵ_1 .

Entonces:

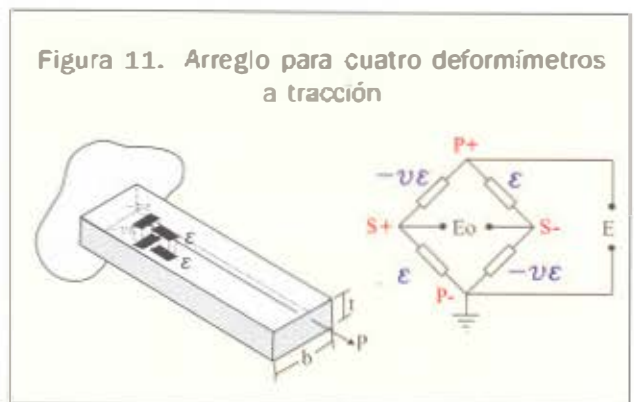
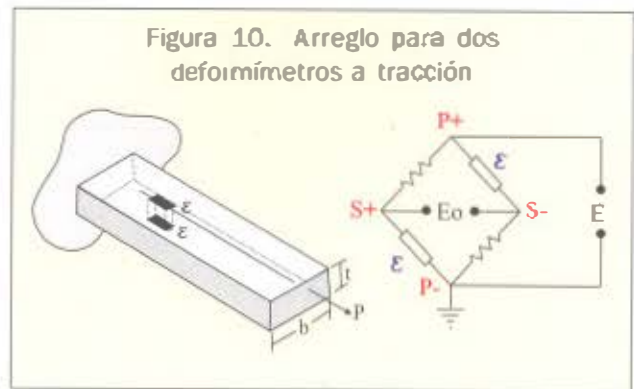
$$\frac{E_o}{E} = \frac{F\epsilon}{4} = B = A,$$

Debido a que es la señal de salida y que además es para un solo deformímetro; la constante de puente es:

$$S = \frac{A}{B} = 1$$

Dos deformímetros a tracción. Como se ve en la figura 10, los deformímetros se conectan en R_1 y R_3 . La señal de salida para este arreglo es:

$$\frac{E_o}{E} = \frac{F(\epsilon_1 - 0 + \epsilon_3 - 0)}{4}$$



como $\epsilon_1 = \epsilon_3 = \epsilon$, entonces:

$$A = \frac{F\epsilon}{2}$$

La salida para un deformímetro es:

$$B = \frac{F\epsilon}{4}$$

Entonces la constante de puente es:

$$S = \frac{A}{B} = 2$$

Cuatro deformímetros a tracción. En este arreglo los deformímetros longitudinales R_1 y R_3 trabajan a tracción y los transversales R_2 y R_4 trabajan a compresión. Ver figura 11.

La ecuación para la salida es:

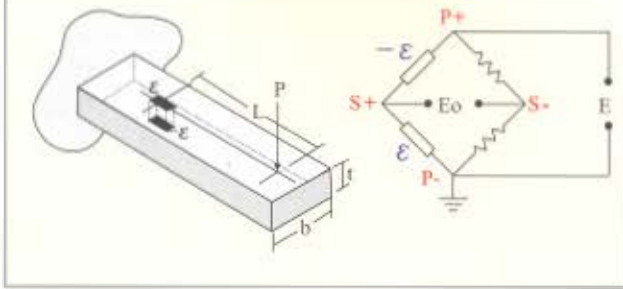
$$\frac{E_o}{E} = \frac{F(\epsilon_1 - \epsilon_2 + \epsilon_3 - \epsilon_4)}{4}$$

Como

$$\epsilon_1 = \epsilon_3 = \epsilon, \text{ y}$$

$$\epsilon_2 = \epsilon_4 = -v\epsilon, \text{ debido a la relación de Poisson,}$$

Figura 12. Arreglo para dos deformímetros a flexión



Entonces:

$$\frac{E_o}{E} = \frac{F(\epsilon - \nu\epsilon + \epsilon - \nu\epsilon)}{4}$$

$$\Rightarrow \frac{E_o}{E} = \frac{F\epsilon(1+\nu)}{2} = A$$

Por lo tanto, la constante del puente es:

$$S = \frac{A}{B} = 2(1+\nu)$$

6.2 Constante de puente para cargas de flexión

Dos deformímetros a flexión. Según la Figura 12, las conexiones se hacen en R_1 , que estará trabajando a tracción, y en R_2 que lo hace a compresión.

Entonces:

$$\frac{E_o}{E} = \frac{F(\epsilon_1 - \epsilon_2)}{4}$$

Como $\epsilon_1 = \epsilon$ y $\epsilon_2 = -\epsilon$, la señal de salida es:

$$\frac{E_o}{E} = \frac{F\epsilon}{2} = A$$

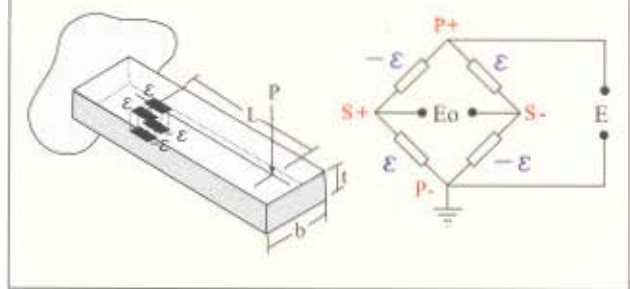
Un deformímetro en un ensayo de flexión trabaja en la misma forma que uno sometido a tracción, por lo tanto:

$$B = \frac{F\epsilon}{4}$$

La constante de puente es $S = \frac{A}{B} = 2$

Cuatro deformímetros a flexión. Caso I. La Figura 13 indica la forma del montaje; las galgas ubicadas en R_1 y R_3 trabajan a tracción, mientras que las ubicadas en R_2 y R_4 trabajan a compresión, pero las cuatro deformaciones son de igual magnitud.

Figura 13. Arreglo para cuatro deformímetros a flexión. Caso I



Entonces:

$$\epsilon_1 = \epsilon_3 = \epsilon$$

$$\epsilon_2 = \epsilon_4 = -\epsilon$$

Por lo tanto:

$$\frac{E_o}{E} = \frac{F(\epsilon_1 - \epsilon_2 + \epsilon_3 - \epsilon_4)}{4} = \frac{F(\epsilon + \epsilon + \epsilon + \epsilon)}{4}$$

$$\Rightarrow \frac{E_o}{E} = F\epsilon = A$$

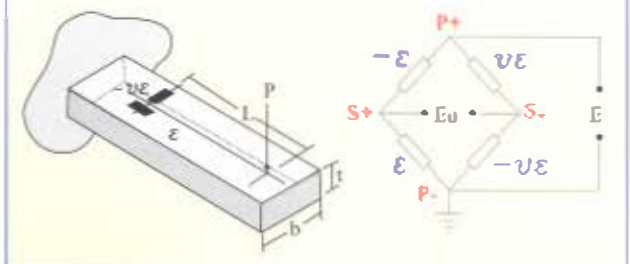
Lo que quiere decir que la constante de puente queda:

$$S = \frac{A}{B} = 4$$

Cuatro deformímetros a flexión. Caso II. En este montaje hay dos deformímetros que trabajan con la relación de Poisson, aunque uno lo hace a tracción y el otro a compresión. En la Figura 14 se ve la disposición de los deformímetros (ϵ_1 y ϵ_2) que van por arriba del elemento de prueba. Por debajo hay otros dos deformímetros (ϵ_3 y ϵ_4) que aunque no se muestran, están ubicados de la misma forma que los de arriba.

Entonces:

Figura 14. Arreglo para cuatro deformímetros a flexión. Caso II



$$\begin{aligned}\epsilon_1 &= \epsilon_2 = \epsilon \\ \epsilon_3 &= -\epsilon_4 = -\epsilon\end{aligned}$$

La ecuación de salida es:

$$\begin{aligned}\frac{E_o}{E} &= \frac{F(\epsilon_1 - \epsilon_2 + \epsilon_3 - \epsilon_4)}{4} = \frac{F(\epsilon + \epsilon + v\epsilon + v\epsilon)}{4} \\ \Rightarrow \frac{E_o}{E} &= \frac{F\epsilon(1+v)}{2} = A\end{aligned}$$

O sea que la constante de puente es:

$$S = \frac{A}{B} = 2(1+v)$$

6.3 Constante de puente para cargas de torsión

Un deformímetro a torsión. En la medición de cargas de torsión en elementos circulares, los deformímetros se colocan sobre el cilindro de ensayo con inclinación de 45° respecto a la generatriz debido a que a 45° se presentan los esfuerzos normales máximos, así como las deformaciones máximas. En la Figura 15 se presenta la ubicación de cuatro deformímetros en la dirección de las deformaciones principales.

Si se coloca un deformímetro que esté a tracción en la dirección de los esfuerzos máximos, la salida es:

$$\begin{aligned}\frac{E_o}{E} &= \frac{F(\epsilon_1 - 0 + 0 - 0)}{4} \\ \Rightarrow \frac{E_o}{E} &= \frac{F\epsilon}{4} = B = A\end{aligned}$$

Por lo tanto la constante de puente es:

$$S = \frac{A}{B} = 1$$



Figura 15. Deformímetros a torsión



Figura 16. Arreglo para dos deformímetros a torsión

Dos deformímetros a torsión. Para el montaje de medio puente se colocan dos de los cuatro deformímetros que se observan en la Figura 15 (uno a tracción y otro a compresión) y se conectan en R_1 y R_2 como se indica en la Figura 16.

Como se utiliza uno que esté sometido a tracción y otro a compresión con deformaciones de igual magnitud, se tiene que:

$$\begin{aligned}\epsilon_1 &= -\epsilon_2 = \epsilon \\ \Rightarrow \frac{E_o}{E} &= \frac{F(\epsilon_1 - \epsilon_2 + 0 - 0)}{4} = \frac{F(\epsilon + \epsilon)}{4}\end{aligned}$$

Para esta configuración la ecuación de salida es:

$$\frac{E_o}{E} = \frac{F\epsilon}{2} = A$$

La constante de puente es:

$$S = \frac{A}{B} = 2$$

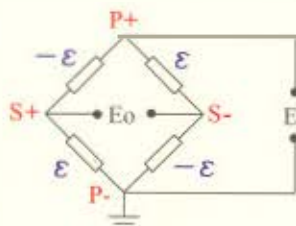
Cuatro deformímetros a torsión. En este arreglo hay dos deformímetros a tracción y dos a compresión; pero sus deformaciones son de igual magnitud. La ubicación en el elemento de prueba se muestra en la Figura 15, y la conexión de los deformímetros en el circuito se presenta en la Figura 17.

$$\begin{aligned}\epsilon_1 &= -\epsilon_2 = \epsilon_3 = -\epsilon_4 = \epsilon \\ \Rightarrow \frac{E_o}{E} &= \frac{F(\epsilon_1 - \epsilon_2 + \epsilon_3 - \epsilon_4)}{4} = \frac{F(\epsilon + \epsilon + \epsilon + \epsilon)}{4}\end{aligned}$$

Entonces la ecuación de salida es $\frac{E_o}{E} = F\epsilon = A$

O sea que la constante de puente es: $S = \frac{A}{B} = 4$

Figura 17. Arreglo para cuatro deformímetros a torsión



Existe una gran variedad de disposiciones que dan como resultado diferentes constantes de puente; en cada caso deben hacerse análisis similares a los anteriores para determinarla, teniendo en cuenta que los valores más altos de esta constante dará mayor sensibilidad de la lectura.

Hay que tener cuidado con la disposición de los deformímetros, ya que existen combinaciones que dan una constante de puente igual a cero, como el caso de tener dos deformímetros que están a tracción y que además sus deformaciones son de igual magnitud, y colocarlos en brazos adyacentes del circuito puente.

$$\Rightarrow \frac{E_a}{E} = \frac{F(\varepsilon - \varepsilon)}{4} = 0 = A, \text{ entonces: } S = \frac{A}{B} = 0$$

7. APLICACIONES ESPECIALES DEL PUENTE DE WHEATSTONE CON DEFORMÍMETROS

En una situación determinada, a menudo es posible colocar deformímetros en arreglos diferentes para obtener los resultados deseados; es así como se logra eliminar componentes no deseadas, por ejemplo: a menudo se desea eliminar la flexión cuando la tracción o compresión por carga axial es lo que interesa; igualmente cuando sólo se desea conocer la componente por flexión y la torsión no interesa en el estudio del eje.

Cuando se incluyen menos de cuatro deformímetros, el instrumento indicador de la deformación suministra internamente las resistencias fijas necesarias para completar el puente.

El análisis que se presenta a continuación toma como referencia la Figura 5, donde se tienen unas resistencias R_1 , R_2 , R_3 y R_4 que representan cada uno de los deformímetros que indicarán deformaciones ε_1 , ε_2 , ε_3 y ε_4 , respectivamente.

Figura 5. (Repetida). Puente de Wheatstone

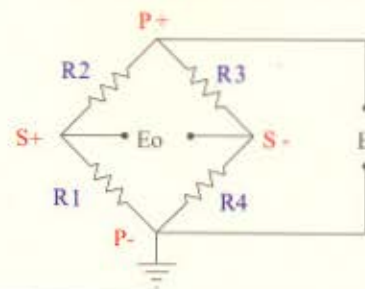
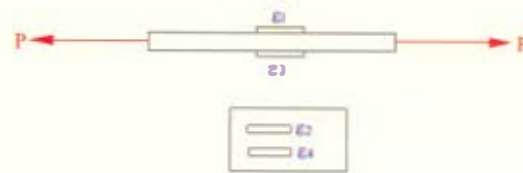


Figura 18. Tracción con flexión



A continuación se analizan los casos más significativos de las aplicaciones especiales del puente de Wheatstone con deformímetros.

7.1 Cargas de tracción

Tracción con flexión. El arreglo mostrado en la figura 18 incluye en la deformación leída, tanto el efecto dado por la carga axial P , como el causado por cualquier posible excentricidad que produce deformación por flexión.

El deformímetro ubicado en R_2 sólo se deforma por temperatura; éste es un deformímetro que se denomina "pasivo" y que puede estar ubicado en una parte no deformada de la pieza de prueba o en otra pieza, pero del mismo material con el fin de captar la influencia de la temperatura del ambiente.

El deformímetro que se ubica en R_1 tiene una deformación por temperatura igual al ubicado en R_2 . Las distintas deformaciones que se presentan, de acuerdo a la causa que la produce, se denotarán de la siguiente forma:

ε_f = causada por momento flector,

ε_p = por carga axial,

ε_t = por momento torsor,

ε_r = por cambio de temperatura,

Para el montaje de la figura 18 se tiene que el deformímetro ubicado en R_1 marcará la deformación así:

$$\varepsilon_1 = \varepsilon_p + \varepsilon_f + \varepsilon_t$$

el deformímetro pasivo, no sometido a deformación por carga, ubicado en R_2 indicará:

$$\varepsilon_2 = \varepsilon_t$$

Por lo tanto la ecuación de salida es:

$$\begin{aligned} \frac{E_o}{E} &= \frac{F(\varepsilon_1 - \varepsilon_2)}{4} = \frac{F(\varepsilon_p + \varepsilon_f + \varepsilon_t - \varepsilon_t)}{4} \\ &\Rightarrow \frac{E_o}{E} = \frac{F(\varepsilon_p + \varepsilon_f)}{4} \end{aligned}$$

Es decir que el arreglo es sensible a la tracción y a la flexión pero insensible a la temperatura. Constante de puente $S = 1$.

Tracción sin efecto de flexión. Caso I. Este arreglo tiene dos deformímetros activos ubicados en R_1 y R_3 , los cuales están encargados de captar las deformaciones por carga, y dos deformímetros pasivos en R_2 y R_4 encargados de la compensación de temperatura. Ver Figura 19.

En este caso, si se presenta flexión, el efecto en los deformímetros activos será igual pero de sentido contrario, lo que indica que sus efectos se anulan. Las deformaciones en cada deformímetro son:

$$\varepsilon_1 = \varepsilon_p + \varepsilon_f + \varepsilon_t$$

$$\varepsilon_3 = \varepsilon_p - \varepsilon_f + \varepsilon_t$$

$$\varepsilon_2 = \varepsilon_t$$

$$\varepsilon_4 = \varepsilon_t$$

La ecuación de salida es:

$$\frac{E_o}{E} = \frac{F(\varepsilon_1 - \varepsilon_2 + \varepsilon_3 - \varepsilon_4)}{4}$$

Reemplazando cada deformación y simplificando resulta:

$$\frac{E_o}{E} = \frac{F\varepsilon_p}{2}$$

Con lo que se demuestra que este arreglo compensa temperatura, es sensible a tracción e insensible a la flexión. La constante de puente es $S = 2$.

Figura 19. Tracción sin flexión. Caso I

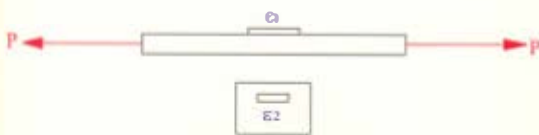
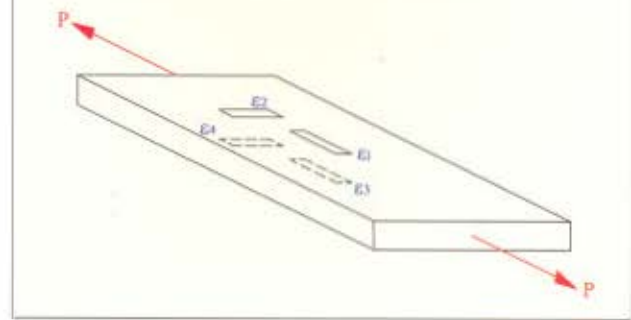


Figura 20. Tracción sin flexión. Caso II



Tracción sin efectos de flexión. Caso II. Otro caso de "Tracción sin efectos de flexión", es el que resulta de colocar los deformímetros como se muestra en la figura 20, en donde hay dos deformímetros montados axialmente sobre el elemento de prueba y otros dos montados transversalmente.

Los deformímetros montados axialmente se ubican en R_1 y R_3 , y los transversales se ubican en R_2 y R_4 .

En caso de flexión o cargas excéntricas, los deformímetros axiales sufren deformaciones iguales pero de sentido contrario; otro tanto sucede con los correspondientes a R_2 y R_4 pero teniendo en cuenta la relación de Poisson. La indicación de las deformaciones es la siguiente:

$$\varepsilon_1 = \varepsilon_p + \varepsilon_f + \varepsilon_t$$

$$\varepsilon_2 = \varepsilon_p' + \varepsilon_f' + \varepsilon_t$$

$$\varepsilon_3 = \varepsilon_p - \varepsilon_f + \varepsilon_t$$

$$\varepsilon_4 = -\varepsilon_p' - \varepsilon_f' + \varepsilon_t$$

Las deformaciones en las que interviene la relación de Poisson se han notado con ('). Aplicando la fórmula para la señal de salida, reemplazando y simplificando se obtiene:

$$\frac{E_o}{E} = \frac{F(2\varepsilon_p + 2\varepsilon_p')}{4}$$

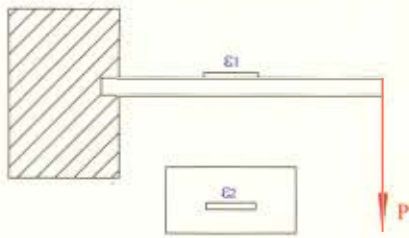
$$S = 2(1 + \nu)$$

Lo que quiere decir que el arreglo tiene compensación de temperatura y es sólo sensible a tracción; la constante de puente para este caso, como ya se vio es:

7.2 Cargas de flexión

Flexión con tracción. La Figura 21 muestra el arreglo más simple para medida de flexión, bajo la acción de una carga P.

Figura 21. Flexión con tracción



Un deformímetro activo se ubica en el elemento de prueba y uno pasivo se emplea para compensación de temperatura. Se ubica un deformímetro activo en R_1 y uno pasivo en R_2 , lo que indica que las deformaciones serán:

$$\varepsilon_1 = \varepsilon_f + \varepsilon_p + \varepsilon_t \quad \varepsilon_2 = \varepsilon_t$$

Al reemplazar en la ecuación de salida y simplificando queda:

$$\frac{E_o}{E} = \frac{F(\varepsilon_f + \varepsilon_p)}{4}$$

Esto indica que se compensa temperatura pero no se elimina el efecto de cargas axiales; este montaje tiene constante de puente igual $S = 1$.

Flexión sin efecto de tracción. En este montaje se ubican dos deformímetros activos, uno en R_1 y otro en R_2 ; la Figura 22 muestra el montaje.

Cuando la carga P actúa, una galga estará sometida a tracción y la otra a compresión, y las deformaciones que se captan son:

$$\varepsilon_1 = \varepsilon_f + \varepsilon_p + \varepsilon_t \\ \varepsilon_2 = \varepsilon_f + \varepsilon_p + \varepsilon_t$$

Al reemplazar en la fórmula de salida se obtiene:

Figura 22. Flexión sin tracción

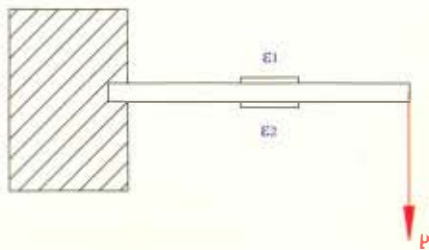
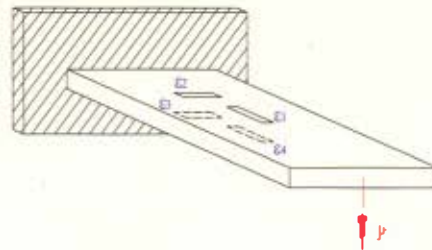


Figura 23. Flexión con mayor sensibilidad



$$\frac{E_o}{E} = \frac{F(\varepsilon_f + \varepsilon_p + \varepsilon_t, -(-\varepsilon_f + \varepsilon_p + \varepsilon_t))}{4} = \frac{2F\varepsilon_f}{4}$$

En este caso hay compensación de temperatura y de los efectos de carga axial con $S = 2$.

Flexión con mayor sensibilidad. En este arreglo hay cuatro deformímetros activos, por lo tanto la compensación por temperatura la hacen ellos mismos. La galga ubicada en R_1 trabaja a tracción, y la ubicada en R_3 también, pero su deformación es función de la relación de Poisson; otro tanto sucede con las ubicadas en R_2 y R_4 pero a compresión.

Este arreglo se puede ver en la Figura 23.

Las deformaciones indicadas son:

$$\varepsilon_1 = \varepsilon_f + \varepsilon_p + \varepsilon_t \\ \varepsilon_2 = \varepsilon_f' - \varepsilon_p' + \varepsilon_t \\ \varepsilon_3 = \varepsilon_f - \varepsilon_p + \varepsilon_t \\ \varepsilon_4 = -\varepsilon_f' + \varepsilon_p' + \varepsilon_t$$

Reemplazando y simplificando en la señal de salida resulta:

$$\frac{E_o}{E} = \frac{F(2\varepsilon_f + 2\varepsilon_f')}{4}$$

Por lo tanto, el arreglo es sensible únicamente a la flexión, con una constante de puente: $S = 2(1+\nu)$.

Flexión con máxima sensibilidad. Para este caso se emplean cuatro galgas activas dispuestas longitudinalmente en la probeta, como lo muestra la Figura 24. Las galgas sometidas a tracción se colocan en R_1 y R_3 , mientras que las sometidas a compresión en R_2 y R_4 . Teniendo en cuenta que se podrían presentar cargas de tracción y variaciones considerables de temperatura, las deformaciones que indican las galgas son:

Figura 24. Flexión con máxima sensibilidad

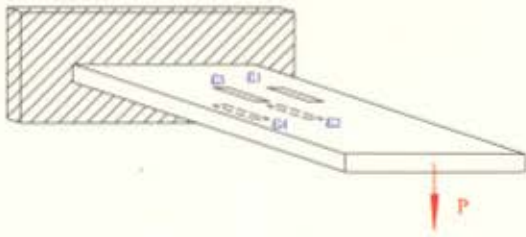
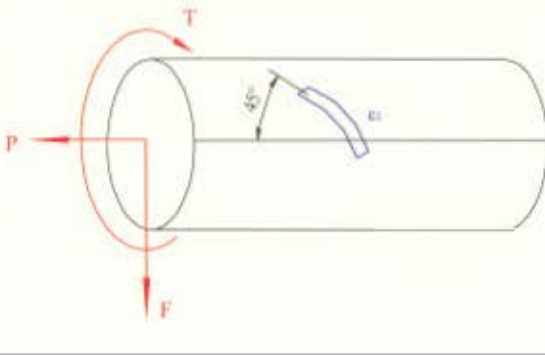


Figura 25. Torsión con un deformímetro



$$\begin{aligned}\epsilon_1 &= \epsilon_t + \epsilon_p + \epsilon_s \\ \epsilon_2 &= -\epsilon_t + \epsilon_p - \epsilon_s \\ \epsilon_3 &= \epsilon_t - \epsilon_p + \epsilon_s \\ \epsilon_4 &= -\epsilon_t + \epsilon_p + \epsilon_s\end{aligned}$$

Entonces la señal de salida es:

$$\frac{E_o}{E} = \frac{F(\epsilon_1 - \epsilon_2 + \epsilon_3 - \epsilon_4)}{4} = F\epsilon$$

Es decir, que se obtiene un arreglo sensible solamente a flexión y con constante de puente $S = 4$.

7.3 Cargas de torsión

Torsión con un deformímetro. El elemento de la figura 25 está sometido a torsión, flexión, tracción y cambios de temperatura y los efectos sobre el deformímetro colocado a 45° de la generatriz son:

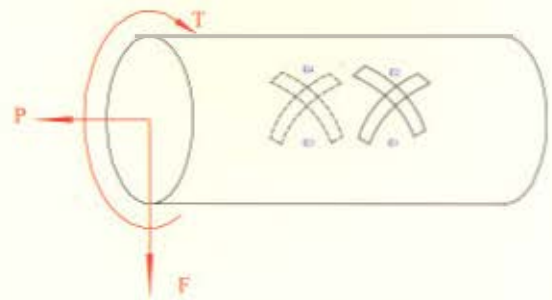
$$\epsilon_1 = \epsilon_t + \epsilon_r + \epsilon_p + \epsilon_s$$

Lo que quiere decir que la señal de salida es:

$$\frac{E_o}{E} = \frac{F(\epsilon_r + \epsilon_t + \epsilon_p + \epsilon_s)}{4}$$

Se demuestra así que éste es un arreglo sensible a torque, flexión, cargas axiales y cambios de

Figura 26. Torsión con cuatro deformímetros



temperatura, lo cual indica que es muy impreciso para medidas de torsión ya que no cancela las otras componentes; su constante de puente es $S = 1$.

Torsión con cuatro deformímetros. El arreglo de la figura 26 está conformado por cuatro deformímetros activos, sometidos a efectos de torsión, flexión, cargas axiales y cambios de temperatura. Las deformaciones que se captan por cada uno de los efectos ya nombrados, sobre cada deformímetro son:

$$\begin{aligned}\epsilon_1 &= \epsilon_r + \epsilon_t + \epsilon_p + \epsilon_s \\ \epsilon_2 &= -\epsilon_r + \epsilon_t + \epsilon_p + \epsilon_s \\ \epsilon_3 &= \epsilon_r - \epsilon_t + \epsilon_p + \epsilon_s \\ \epsilon_4 &= -\epsilon_r - \epsilon_t + \epsilon_p + \epsilon_s\end{aligned}$$

Teniendo en cuenta estas deformaciones la señal de salida es:

$$\frac{E_o}{E} = \frac{4F\epsilon_r}{4} = F\epsilon_r$$

Este arreglo es de máxima sensibilidad en la medición del torque, eliminando los demás efectos y compensando las variaciones de temperatura; la constante de puente es: $S = 4$

CONCLUSIONES

Aunque los strain gages han sido implementados en muchas aplicaciones a nivel mundial hace ya varias décadas, no pierden su vigencia en el ámbito científico; prueba de ello es la instalación y actual utilización de strain gages en el vehículo explorador "Spirit" enviado por la NASA a Marte.

La forma más precisa y sencilla de medir el esfuerzo real en cualquier punto de un elemento sometido a carga es la medición directa de la deformación en ese punto.

El deformímetro eléctrico es un elemento muy útil en la medida experimental del esfuerzo, ya que en el diseño muchas veces no se puede saber con anterioridad el esfuerzo real en un punto determinado, debido a que en dicho punto pueden haber concentraciones de esfuerzo, no homogeneidad del material, superficies muy complejas, etc., que limitan el cálculo teórico.

Fácilmente, es posible utilizar deformímetros en la fabricación de transductores para la medición de variables físicas como masa, fuerza, presión, esfuerzos, desplazamientos, torque, etc.; por lo tanto hay muchas posibilidades de realización de proyectos relacionados con este tema.

La implementación de prácticas de laboratorio para la medición directa de las deformaciones permiten visualizar los conceptos teóricos de deformación y esfuerzo.

El procedimiento de instalación del deformímetro eléctrico influye en los resultados esperados. En un método tan preciso como lo es el uso de deformímetros eléctricos en la medición de variables de ingeniería, generalmente las desviaciones en la lectura de la deformación real es consecuencia de una mala instalación.

BIBLIOGRAFÍA

ASTM Standard E251, Part III. *Standard Test Method for Performance Characteristics of Bonded Resistance Strain Gages*.

CIPAMOCHA GARAVITO, José S. *Selección y construcción de un dinamómetro para medición de fuerzas en el torneado*. Bogotá, 1985, 160 p. Trabajo de grado (Ingeniero Mecánico). Universidad Nacional de Colombia. Facultad de Ingeniería.

DOEBELIN, Ernest O. *Measurements Systems: Application and Design*, 4 ed. New York: Mc Graw Hill, 1990.

MACHADO ACOSTA, Cristian M., GALINDO GONZÁLEZ, Orlando. *Estudio y estructuración de procedimientos para la medición de deformaciones por medio de deformímetros eléctricos*. Bogotá, 2001, 174 p. Trabajo de grado (Ingeniero Mecánico). Universidad Nacional de Colombia. Facultad de Ingeniería.

MIRANDA GARZÓN, Juan C. *Diseño y construcción de un transductor de torque dinámico*. Bogotá, 1995, 174 p. Trabajo de grado (Ingeniero Mecánico). Universidad Nacional de Colombia. Facultad de Ingeniería.

PERRY, C.C. *The strain gage primer*, 2 ed. New York: Mc Graw Hill, 1962.

INFOGRAFÍA

www.measurementsgroup.com

www.kyowa-ei.co.jp

www.straingage.com

www.hbm.com

www.omega.com

www.vishay.com

Los diferentes arreglos de deformímetros en el Punteo de Wheatstone permiten aumentar la sensibilidad de la lectura y por lo tanto la precisión puede ser mayor.

De la misma forma, se pueden obtener ciertos arreglos que permiten captar deformaciones independientes para un estado general de esfuerzo, es decir, si se tienen cargas de tracción, flexión y torsión de manera simultánea, es posible obtener por separado la deformación que cada una de estas cargas produce.

Mediante la implementación de tecnologías actuales de adquisición, procesamiento y análisis de datos es posible desarrollar proyectos de investigación que permitan concluir comportamientos de un sin número de puntos de una misma estructura.

Es necesario correlacionar los datos obtenidos a través de los strain gages, con sistemas de alta velocidad de procesamiento de información en estudios que involucren sistemas de tipo dinámico.

Un completo estudio del diseño en Ingeniería involucra un minucioso desarrollo teórico, un robusto análisis con herramientas computacionales de simulación, y una fase de experimentación implementando sistemas automatizados de adquisición de señales, procesamiento de datos y análisis de resultados.