

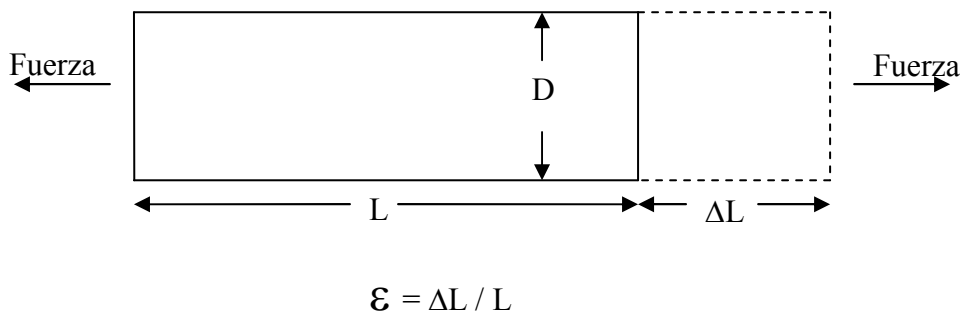
# **Galgas Extensiométricas**

## **Strain Gages 1**

Parte del Trabajo final del ahora Ing. Javier Sosa quién gentilmente autorizó su publicación en esta página.

### 3.1 Qué es un strain gage?

Un extensómetro, galga extensiométrica o “strain gage” (en inglés) es un dispositivo de medida universal que se utiliza para la medición electrónica de diversas magnitudes mecánicas como pueden ser la presión, carga, torque, deformación, posición, etc. Se entiende por strain o esfuerzo a la cantidad de deformación de un cuerpo debida a la fuerza aplicada sobre él. Si lo ponemos en términos matemáticos, strain ( $\epsilon$ ) se define como la fracción de cambio en longitud, como de demuestra la figura 3.1 a continuación:



**Figura 3.1 Definición de strain**

El parámetro strain puede ser positivo (tensión) o negativo (compresión). Si bien es adimensional, en muchos casos se suele expresar en unidades de mm/mm. En la práctica, la magnitud de medida de strain es muy pequeña por lo que usualmente se expresa como microstrain ( $\mu\epsilon$ ), que es  $\epsilon \times 10^{-6}$ .

Cuando una barra es tensionada por una fuerza uniaxial, como en la Figura 3.1, un fenómeno conocido como esfuerzo de Poisson causa que la circunferencia de la barra se contraiga en la dirección transversal o perpendicular. La magnitud de esta contracción transversal es una propiedad del material indicado por su coeficiente de Poisson.

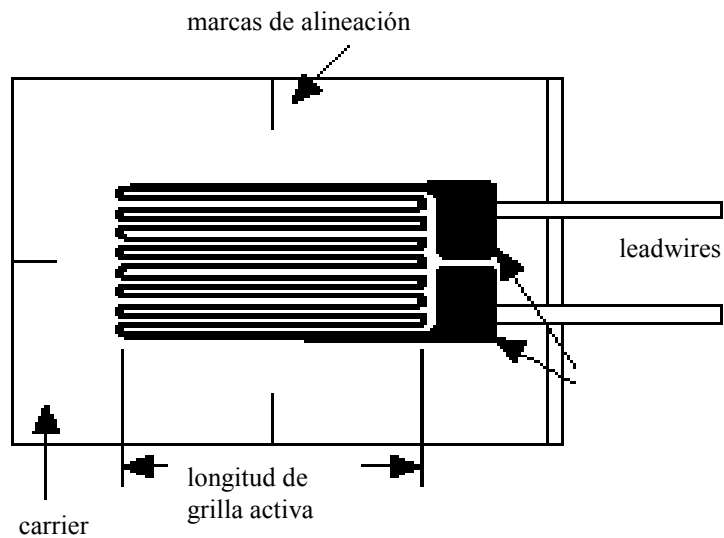
La relación de Poisson  $\nu$  del material es definido como el radio negativo del esfuerzo en la dirección transversal (perpendicular a la fuerza) al esfuerzo en la dirección axial (paralelo a la fuerza) o  $\nu = \epsilon_T / \epsilon$ . El radio de Poisson para el acero, por ejemplo, va de 0.25 a 0.3.

Se conocen varios métodos para medir esfuerzo, pero el más utilizado es mediante un strain gage, dispositivo cuya resistencia eléctrica varía de forma proporcional al esfuerzo a que éste es sometido. El strain gage más ampliamente utilizado es el confinado en papel metálico o “bonded metallic” strain gage.

El strain gage metálico consiste en un cable muy fino o papel aluminio dispuesto en forma de grilla. Esta grilla, maximiza la cantidad de metal sujeto al esfuerzo en la

dirección paralela, figura 3.2. La grilla está pegada a un fino respaldo llamado “carrier”, el cual está sujeto directamente a la pieza bajo medida. Por lo tanto, el esfuerzo experimentado por la pieza es transferido directamente al strain gage, el cual responde con cambios lineales de resistencia eléctrica.

Los strain gages se encuentran en el mercado con valores nominales de resistencia de 30 a 3000Ω, con 120, 350 y 1000Ω como los valores más comunes.



**Figura 3.2 Strain gage metálico**

Es de suma importancia que el strain gage sea apropiadamente montado sobre la pieza para que el esfuerzo sea transferido adecuadamente desde la pieza a través del adhesivo y el material de respaldo hasta la misma grilla metálica.

Un parámetro fundamental de los strain gage es la sensibilidad al esfuerzo, expresado cuantitativamente como el factor de galga (GF). El factor de galga es definido como la relación de variación fraccional de resistencia eléctrica y la variación fraccional de longitud:

$$GF = \frac{\Delta R/R}{\Delta L/L} = \frac{\Delta R/R}{\epsilon}$$

El factor de galga típico para un strain gage metálico es de aproximadamente 2.

### 3.2 Selección del strain gage

El paso inicial para preparar la instalación de cualquier strain gage es la elección de la galga apropiada para la tarea específica. Puede parecer en principio que dicha tarea es un ejercicio simple pero en realidad no es así. Una selección racional y cuidadosa de las características y parámetros del strain gage puede ser muy importante en lo que

respecta a: 1) la optimización de la performance del strain gage para condiciones de operación y ambientales específicas; 2) la obtención de una medida de esfuerzo confiable y precisa; 3) facilidad de instalación; 4) minimizar el costo de instalación del strain gage.

Muchos factores, como la duración en el tiempo, el rango de esfuerzo requerido, y la temperatura de operación deben ser considerados para elegir la mejor combinación de strain gage/adhesivo para una prueba determinada.

### **Parámetros del strain gage:**

La instalación y las características de operación del strain gage están afectadas por los siguientes parámetros que pueden ser seleccionados en diferentes grados:

- Sensibilidad al esfuerzo de la aleación
- Autocompensación de la temperatura
- Material de respaldo (carrier)
- Resistencia de la grilla
- Longitud de la galga
- Patrón de galga

### **Parámetros a evaluar:**

Básicamente, el proceso de selección de la galga consiste en determinar una combinación particular de parámetros que sea lo más compatible con las condiciones ambientales y de operación, y al mismo tiempo, que mejor satisfaga la instalación y requerimientos. Estos requerimientos pueden ser:

- Precisión
- Durabilidad
- Estabilidad
- Temperatura
- Facilidad de instalación
- Elongación
- Resistencia cíclica
- Resistencia ambiental

El valor no es una consideración primaria en la selección del strain gage, pues una significativa economía en la medición se logra con el valor del equipamiento completo, en donde el strain gage es sólo una pequeña fracción. En muchos casos, es preferible elevar el costo del strain gage para disminuir el de la instalación.

## **3.3 Compromiso de selección**

Debemos notar que el proceso de selección de strain gages generalmente trae aparejado compromisos. Esto es porque la elección de parámetros que tienden a

satisfacer algún requerimiento, pueden obrar en contra de otros. Por ejemplo, en lugares donde el espacio disponible para la instalación del strain gage es limitado y el gradiente de esfuerzo es extremadamente elevado, una de las galgas disponibles más cortas parece ser la opción obvia. Sin embargo, las galgas más pequeñas de 3mm están generalmente caracterizadas por una elongación máxima pequeña, vida útil reducida por fatiga, comportamiento menos estable y mayor dificultad para su instalación. Es necesario llegar a un compromiso global para satisfacer cualquier conjunto de circunstancias, y juzgar ese compromiso en la validez y precisión de los datos obtenidos.

### 3.4 Tipos de aleaciones para strain gages

En esta reseña nos basaremos en los modelos de strain gage de Vishay Micro-Measurements puesto que es un fabricante de renombre mundial y además serán las utilizadas en la medición.

El componente principal que determina las características de operación de un strain gage es la aleación sensible al esfuerzo que compone la grilla de papel metálico. Sin embargo, la aleación no es en todos los casos un parámetro de selección independiente. Esto es porque cada serie de strain gage de Micro-Measurements (identificada por las primeras dos o tres letras de un código alfanumérico) se diseña como un sistema completo, compuesto por la combinación de un respaldo y un papel metalizado particular que generalmente incorpora otras características específicas (como encapsulamiento, pistas, etc) a las series.

Micro-Measurements ofrece la siguiente variedad de aleaciones de strain gages:

- Aleación A: Constantan, una aleación de cobre y nickel, autocompensado por temperatura.
- Aleación P: Constantan templado,
- Aleación D: Aleación isoelástica de cromo y nickel
- Aleación K: Aleación de cromo y nickel; Karma autocompensado por temperatura.

#### **Aleación Constantan:**

De todas las aleaciones modernas de strain gage, la de constantan es la más antigua, y aún así la más usada. Esta situación refleja que el constantan provee la mejor combinación global de propiedades necesarias para la mayoría de las aplicaciones de los strain gages. Esta aleación tiene por ejemplo, una alta sensibilidad al esfuerzo, o factor de galga, y es relativamente insensible a la temperatura. Su resistividad es lo

suficientemente alta como para lograr valores adecuados de resistencia aún para pequeñas grillas y su coeficiente de temperatura para resistencias no es excesivo. Además, el constantan es caracterizado por una muy buena vida útil y una relativamente buena capacidad de elongación. Se debe notar, sin embargo, que el constantan tiende a exhibir un desvío o “drift” continuo a temperaturas superiores de 65 °C, esta característica se debe tener en cuenta cuando la estabilidad en cero del strain gage es crítica sobre períodos prolongados.

### **Aleaciones A:**

Tenemos que remarcar que el constantan o aleación A, se puede procesar con el fin de autocompensar la temperatura para cumplir con un amplio rango de coeficientes de expansión de materiales. Las aleaciones A son proporcionadas con autocompensación de temperatura (STC, self temperature-compensation) números 00, 03, 05, 06, 09, 13, 15, 18, 30, 40 y 50, para uso en materiales de prueba con el correspondiente coeficiente de expansión térmico (expresado en ppm/ °F)

### **Aleación P:**

Para la medición de esfuerzos muy grandes, 5% (50000 microstrain) o más, el constantan templado (aleaciones P) es seleccionado normalmente como el material de la grilla. El constantan es muy dúctil, y, en strain gages con longitudes de 3mm o más, pueden ser tensado más de un 20%. Se debe tener en cuenta, sin embargo, que bajo grandes esfuerzos cíclicos, la aleación P exhibirá cambios permanentes en la resistencia eléctrica provocando un cambio en la graduación del cero en la galga. A causa de estas características, y la tendencia de una falla prematura de la grilla por fatiga, la aleación P no es muy comúnmente recomendada para esfuerzos cíclicos. Las aleaciones P se pueden encontrar con temperatura autocompensada (STC) con números 08 y 40 para metal y plástico, respectivamente.

### **Aleaciones isoelásticas:**

Cuando las medidas de esfuerzo son puramente dinámicas – esto es, cuando no es necesario mantener estable una referencia cero – la aleación isoelástica (aleación D) ofrece ciertas ventajas. Dentro de las principales, podemos citar una larga vida útil soportando la fatiga comparada con las aleaciones A, y un alto factor de galga (aproximadamente 3.2) que mejora la relación señal a ruido en pruebas dinámicas.

Las aleaciones D no están sujetas a la autocompensación de temperatura, es más, la salida térmica es tan grande (aproximadamente 145 microstrain/°C) que esta aleación no es normalmente usada para medidas de esfuerzo estáticas. Existen ocasiones, sin embargo, en que las aleaciones D se aplican a transductores de propósito especial cuando se necesita una salida elevada y se puede utilizar un arreglo tipo puente para lograr una compensación razonable de temperatura mediante circuitería.

Otras propiedades de las aleaciones D se pueden considerar a partir del material de la grilla, por ejemplo, éste es magnetoresistivo, y su respuesta es en cierto grado no lineal, siendo significativa para esfuerzos más allá de  $\pm 5000$  microstrain.

## **Aleaciones Karma:**

La aleación Karma, o Karma modificada, con su amplia área de aplicación, representa a un miembro importante en la familia de aleaciones de strain gages. Esta aleación se caracteriza por una buena vida útil y excelente estabilidad; y es la selección preferida para mediciones estáticas de esfuerzo de alta precisión durante largos períodos de tiempo (meses o años) a temperatura ambiente. Se recomienda para medidas estáticas extendidas de esfuerzo sobre los rangos de temperatura que van de -269 a +260 °C. Para períodos cortos, los strain gages encapsuladas de tipo K pueden ser expuestas a temperaturas tan altas como +400°C. Una atmósfera inerte mejorará la estabilidad y extiende la vida útil de la galga a altas temperaturas.

Entre sus otras ventajas, las aleaciones K poseen una salida térmica más plana que las aleaciones A, de esta manera, permite una corrección mucho más precisa del error debido a la salida térmica a temperaturas extremas. Como el constantan, las aleaciones K pueden ser autocompensadas por temperatura para su uso sobre materiales con diferentes coeficientes de expansión. Los números disponibles de STC para aleaciones K son limitados: 00, 03, 05, 06, 09, 13 y 15. La aleación K es la elección adecuada cuando se requiere de una galga autocompensada por temperatura que se adapte a las condiciones ambientales y su performance no sea atendible por una galga tipo A.

## **Cobre doble capa:**

Debido a la dificultad para soldar directamente sobre la aleación K, la característica de cobre doble capa, que en un principio era opcional, es ahora estandar. La doble capa es formada precisamente por cobre en forma de almohadilla o punto, dependiendo del espacio disponible.

## **3.5 Material de respaldo o “carrier”**

La confección de strain gages se realiza mediante un grabado del papel metálico sobre un material de respaldo o “carrier” que cumple con las siguientes funciones:

- Proveer el medio de sustento a la grilla metálica durante la instalación.
- Presentar una superficie para confinar y pegar la galga al material de prueba.
- Proveer un aislamiento eléctrico entre la grilla y el material de prueba.

Los materiales de respaldo provistos por Micro-Measurements para sus strain gages son básicamente de dos tipos: polímeros y epoxy-fenólicos reforzados con fibra de vidrio. En el caso de las aleaciones sensibles al esfuerzo, los materiales de respaldo no son parámetros independientes, se presentan en combinaciones de aleaciones y

material de respaldo con características constructivas especiales a los que llaman sistemas y se les aplican designadores de series. Como resultado, cuando se llega a un tipo óptimo de galga para una aplicación en particular, el proceso no permite la combinación arbitraria de aleación con material de respaldo sino que requiere la especificación de una de las series disponibles en particular. Cada una de estas series, tiene sus propias características y áreas de aplicación en particular y las recomendaciones para su selección se dan usualmente en tablas especiales como “Strain Gage Series and Adhesive Selection table”. A continuación se detallan los diferentes materiales de respaldo, y dado que en la sección anterior se habló de las distintas aleaciones, se pretende ayudar a la comprensión de las distintas combinaciones para cada una de las series disponibles.

### **Polímeros:**

El polímero clase E es un material de respaldo duro, extremadamente flexible y puede ser contorsionado para caber en pequeños radios. Además, debido a la gran resistencia del conjunto material de respaldo-aleación a base de polímeros, estas galgas son mucho menos sensibles a ser dañadas durante su instalación. Gracias a su durabilidad e idoneidad para uso sobre rangos de temperatura que van de  $-195$  a  $+175$  °C, los materiales de respaldo a base de polímeros son una opción ideal para medidas de esfuerzo tanto estáticas como dinámicas. Este material de respaldo es capaz de soportar grandes elongaciones y puede ser utilizado para medir elongaciones plásticas excesivas de un 20%. Las distintas series de galgas con material de respaldo a base de polímeros se pueden encontrar bajo la nomenclatura: EA-, CEA-, EP-, EK-, S2K-, N2A-, y finalmente ED-; para especificaciones sobre cada una de ellas referirse a la página web de Vishay.

### **Epoxi-fenólicas:**

Los materiales de respaldo epoxi-fenólicos reforzados con fibra de vidrio son la mejor elección para un excepcional desempeño sobre un amplio rango de temperaturas. Estos materiales pueden ser usados tanto para medidas estáticas como dinámicas desde  $-269$  a  $+290$ °C. En aplicaciones de corta duración, la temperatura superior puede ser extendida hasta los  $-750$ °C. La máxima elongación aceptable por el material es limitada al 1 o 2%. Las distintas series de galgas con material de respaldo a base de epoxi-fenólico se pueden encontrar bajo la nomenclatura: WA , WK , SA , SK , WD , and SD

## **3.6 Series de galgas**

Como se mencionó anteriormente, para la elección de un strain gage nos basamos en una tabla en particular llamada “Strain Gage Series and Adhesive Selection table”, la



cual nos provee de la galga recomendada a partir de un perfil de prueba, categorizado con el siguiente criterio:

- Tipo de medida de esfuerzo (estática, dinámica, etc)
- Temperatura de operación de la galga instalada
- Prueba de duración
- Precisión requerida
- Resistencia cíclica requerida

Esta tabla nos provee de los medios básicos para la elección preliminar del strain gage para la mayoría de las aplicaciones. También incluye recomendaciones para adhesivos, puesto que los adhesivos en un strain gage forman parte del sistema y por lo tanto afecta el rendimiento de la galga. Esta tabla de selección se complementa con otra (“Standard Gage Series table”) y junto a un catálogo se llega a la selección final de la galga.

### 3.7 Características de un strain gage

#### Longitud de una galga:

Es la región activa o longitud de la grilla sensible al esfuerzo de una galga. Los codos y almohadillas de soldadura no se consideran sensibles al esfuerzo debido a su gran sección transversal y su baja resistencia eléctrica. Para satisfacer las amplias necesidades de análisis de esfuerzos se ofrecen longitudes de galgas que van de 0.2mm a 100mm.

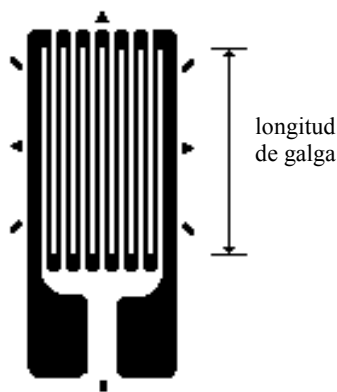
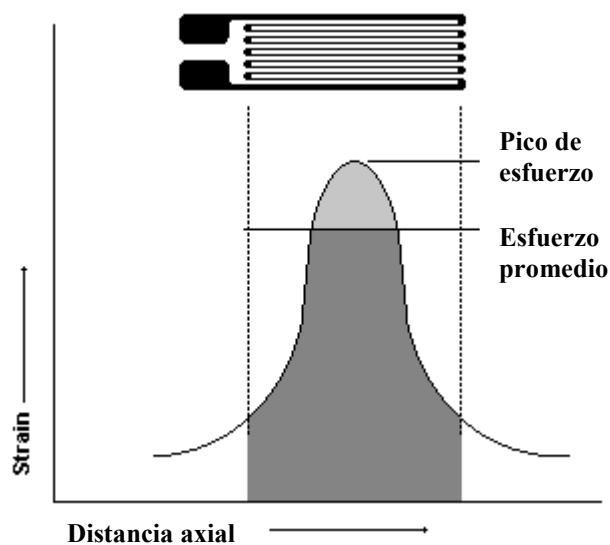


Figura 3.3 Longitud de un strain gage

### Concentración del esfuerzo:

La longitud de la galga es usualmente un factor muy importante a la hora de determinar su rendimiento bajo ciertas circunstancias. Por ejemplo, las medidas de esfuerzo son realizadas, en general, sobre las piezas o estructuras críticas de una máquina (sometidas a mayor esfuerzo). Y muy frecuentemente, las piezas más fatigadas son las que se encuentran sometidas mayor esfuerzo, donde el gradiente de esfuerzo es más pronunciado y el área de mayor esfuerzo se circunscribe a una pequeña región. Los strain gage tienden a integrar, o promediar, el área cubierta por la grilla. Puesto que el promedio de la distribución de un esfuerzo no uniforme es siempre menor al máximo, un strain gage que es más larga que la máxima región de esfuerzo, indicará una magnitud de esfuerzo muy bajo. La figura siguiente ilustra de forma representativa la distribución de esfuerzo en la vecindad de la concentración de esfuerzo, y demuestra el error en el esfuerzo indicado para un strain gage demasiado largo con respecto a la zona de máximo esfuerzo.



**Figura 3.4 Distribución del esfuerzo sobre un strain gage**

Como una regla general, en lo posible, la longitud de la galga no debe ser mayor a la dimensión de la causa del esfuerzo para que la medición sea aceptable. Cuando la causa del esfuerzo es pequeña, digamos del orden de 13mm, la regla general conduciría a longitudes de galgas muy chicas. Puesto que el uso de galgas muy pequeñas introduce otros tipos de problemas, se tiene que llegar a una relación de compromiso.

### **Galgas cortas:**

Los strain gages cuya longitud es de alrededor de 3mm tienden a exhibir su rendimiento un tanto degradado (particularmente con respecto a su máxima elongación, su estabilidad bajo esfuerzo estático y su durabilidad cuando está sometida a esfuerzo cíclico alternativo). Cuando cualquiera de estas características empobrecen la precisión de la medición en mayor medida que el promedio del esfuerzo se justifica la utilización de una galga de mayor longitud.

### **Galgas largas:**

Cuando se justifica su empleo, las galgas largas ofrecen ciertas ventajas que valen la pena mencionar. Son, casi siempre, más fáciles de manipular en todos los aspectos de la instalación y cableado que las galgas miniatura (13mm). Más aún, las galgas largas proveen una mejor disipación de calor porque debido a su resistencia nominal tienen menor potencia por unidad de área de grilla. Estas consideraciones pueden ser muy importantes a la hora de trabajar sobre materiales plásticos u otros materiales con pobre disipación de calor. Una inadecuada disipación de calor trae aparejada una sobre elevación de temperatura en la grilla, material de respaldo, adhesivo y superficie de prueba, y puede afectar notablemente el rendimiento y la precisión.

### **Promediación del esfuerzo:**

Otra aplicación de los strain gages largos (en este caso, muy largos) es la medición de esfuerzos sobre materiales no homogéneos. Consideremos el caso concreto de una mezcla de un agregado, generalmente piedra, y cemento. Cuando medimos esfuerzo sobre una estructura de concreto, es habitualmente deseable utilizar una galga lo suficientemente larga como para abarcar varias piezas de agregado con el fin de tomar una muestra representativa del esfuerzo sobre la estructura. Dicho esto de otro modo, lo que se busca en este tipo de mediciones son los promedios y no los puntos máximos de esfuerzo situados en la interfaz piedra-cemento. En general, cuando medimos esfuerzo sobre estructuras formadas por distintos compuestos de cualquier clase, la longitud de la galga debe ser mayor a la de las partículas del material no homogéneo.

## **3.8 Patrón de grilla**

El patrón de grilla se refiere a la forma de la grilla, el número y orientación de las grillas en las galgas multi-grillas o rosetas, la configuración de las almohadillas, y varias características constructivas que son estandar para un patrón particular. La gran

variedad de patrones disponibles se han diseñado para satisfacer el amplio rango de instalaciones medidas a través de strain gages.

- **Galgas uniaxiales**

Consiste en una galga de simple grilla, con patrón apropiado a una aplicación particular que depende particularmente de:

**Almohadillas:**

Deben ser, por supuesto, compatibles en tamaño y orientación con el espacio disponible. Además, es importante que el arreglo de almohadillas sea tal que facilite al operario realizar las conexiones pertinentes.

**Ancho de grilla:**

Cuando existen severos gradientes de esfuerzo perpendiculares al eje de la galga sobre la superficie de prueba, una grilla estrecha minimizará el error por promediación. Las grillas amplias, cuando sean apropiadas para la instalación, mejorarán la disipación de calor y reforzarán la estabilidad (particularmente cuando la galga se instale sobre un material con pobre transferencia de calor)

**Resistencia de galga:**

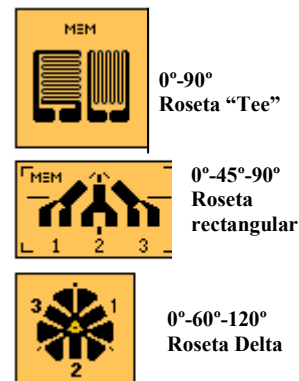
En ciertas instancias, la única diferencia entre dos galgas disponibles de la misma serie, es la resistencia eléctrica (típicamente  $120\Omega$  contra  $350\Omega$ ). Cuando existen estas opciones, la galga con mayor resistencia se prefiere pues reduce la disipación la generación de calor en un factor de tres (el mismo voltaje se aplica a la galga). También se tiene como ventaja a la disminución de ciertos efectos debido a las pistas como la menor sensibilidad del circuito gracias a la resistencia de las pistas tanto como a las variaciones de señal indeseadas a causa de los cambios de resistencia con fluctuaciones de temperatura. Además, cuando las galgas incluyen llaves, bucles o fuentes aleatorias de resistencia variable, la relación señal a ruido se ve mejorada con galgas con resistencia mayor para el mismo nivel de potencia.

En análisis experimentales de esfuerzos, una galga de simple grilla se utilizaría si sólo si se conoce de forma fehaciente que el esfuerzo en el punto de medida es uniaxial y la dirección de dichos esfuerzos es conocida con una precisión razonable. Estos requerimientos limitan seriamente el campo de aplicación de los strain gages de simple grilla en el análisis de esfuerzos y la no consideración de esfuerzos biaxiales pueden llevar a grandes errores de medición.

- **Rosetas**

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 conoce de antemano, una roseta de dos elementos,  $90^\circ$ , puede ser empleada con las direcciones de los ejes alineadas con los esfuerzos. Las direcciones principales de esfuerzos pueden ser determinadas con suficiente precisión por varios métodos. Por ejemplo, la forma de un objeto y el modo en que se carga pueden ser de manera tal que las direcciones principales de esfuerzos resulten obvias por la simetría del problema. Las principales direcciones de esfuerzos pueden ser también definidas por PhotoStress® testing.

En la mayoría de los casos de superficies bajo esfuerzos, cuando las direcciones principales de los esfuerzos no son conocidas, una roseta de tres elementos debe ser utilizada. Dicha roseta puede ser ubicada con cualquier orientación, pero usualmente se dispone de manera que una de sus grillas se encuentre alineada con un eje principal de la pieza a probar. Las rosetas de tres elementos se encuentran disponibles en configuraciones rectangulares de  $45^\circ$  tanto como configuraciones Delta de  $60^\circ$ .

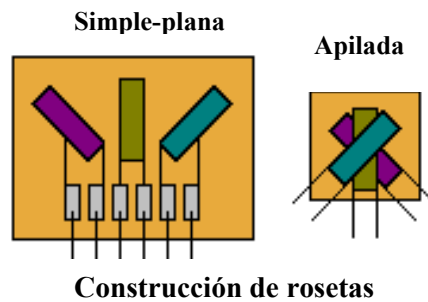


**Nota:**

El método de PhotoStress® consiste en aplicar una pequeña capa o lámina sobre la pieza de prueba para luego cargarse. La lámina es vista a través de un polariscopio de reflexión y el esfuerzo sobre dicha lámina puede ser visualizado como un patrón de colores. Este patrón de colores es el que revela inmediatamente la distribución de esfuerzos global y señala las áreas que lo concentran. Con un transductor óptico montado sobre el polariscopio de reflexión, se puede obtener una medida cuantitativa de los esfuerzos sobre la pieza.

### 3.9 Construcción de un strain gage

Cuando se piensa utilizar una roseta, debemos ser cuidadosos y tener en consideración si es simple-plana o es apilada. Para una longitud de galga determinada, la roseta simple-plana es mejor que la apilada en la transferencia de calor a la pieza de prueba y generalmente provee de mejor estabilidad y precisión para mediciones de esfuerzos estáticos. Más aún, cuando existe un gradiente de esfuerzo significativo perpendicular a la superficie de esfuerzo, la roseta simple-plana arroja datos de esfuerzos más precisos pues todas las áreas se encuentran más próximas a la superficie de la pieza de prueba posible. Otra consideración es que las rosetas apiladas son difíciles para contornear superficies circulares que las rosetas simple-plana.



Por otro lado, cuando hay largos gradientes de esfuerzos sobre la superficie de la pieza de prueba, como es usualmente el caso, la roseta simple-plana puede producir errores en la indicación de esfuerzo puesto que las grillas muestrean al esfuerzo sobre diferentes puntos. Para este tipo de aplicaciones la roseta apilada es preferible. La roseta apilada se prefiere también cuando el espacio de instalación es limitado.

### 3.10 Características opcionales

En el mercado se ofrecen una serie de características opcionales para los sensores especiales y strain gages. La adición de estas opciones a las galgas básicas aumentan el costo, pero generalmente el beneficio que se obtiene justifica dicho aumento. Algunos ejemplos son:

- Reducción significativa del tiempo y costo de instalación
- Reducción de la habilidad necesaria para realizar una instalación fiable
- Aumentar la confiabilidad de las aplicaciones
- Simplificar la instalación de sensores en lugares difíciles
- Aumentar la protección, tanto en la manipulación durante la instalación como en el ambiente de operación
- Alcanzar características especiales de rendimiento

#### Catálogo estandar de opciones:

**Opción W:** terminales y encapsulado integrales

**Opción E:** encapsulamiento con almohadillas expuestas

**Opción SE:** encapsulamiento y puntos de soldadura

**Opción L:** pistas pre-adjuntadas

**Opción LE:** pistas pre-adjuntadas y encapsulamiento

**Opción P:** pistas pre-adjuntadas con cables y encapsulamiento

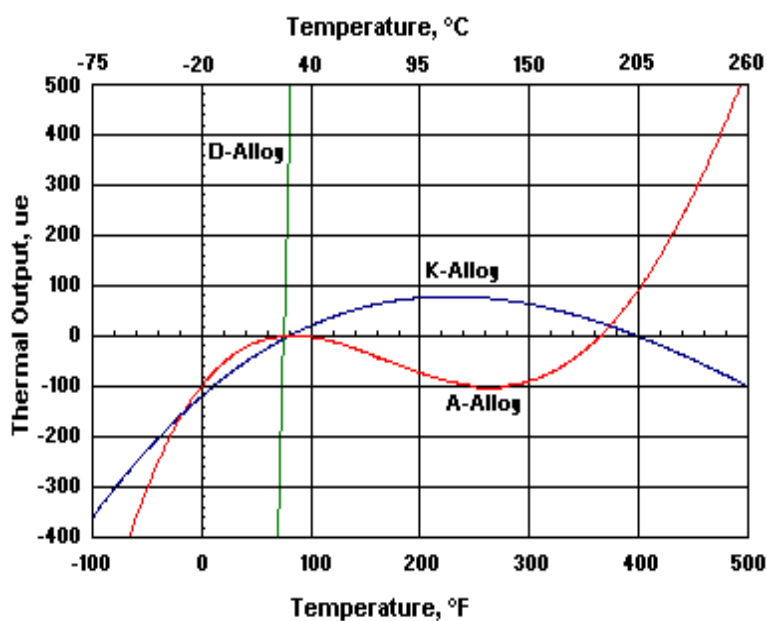
**Opción R:** determinación individual del valor de resistencia

**Opción S:** puntos de soldadura

**Opción W3:** terminales especiales

### 3.11 Autocompensación de temperatura

Una importante propiedad compartida tanto por los strain gages de constantan y Karma modificado es su respuesta a procesos especiales gracias a su autocompensación de temperatura. Las galgas autocompensadas son diseñadas para producir una salida térmica mínima (la temperatura induce esfuerzos aparentes) sobre un rango de temperatura que va desde los  $-45^{\circ}\text{C}$  a los  $+200^{\circ}\text{C}$ . Cuando se elige un strain gage compuesto tanto de constantan (aleación A) o un Karma modificado (aleación K), se debe especificar el número STC. Este número es una aproximación al coeficiente de expansión térmica en  $\text{ppm}/^{\circ}\text{F}$  del material estructural sobre el cual la galga mostrará una mínima salida térmica.



### Figura 3.5 Curvas de salida en función de la temperatura

El gráfico térmico de salida ilustra las características térmicas típicas de salida para aleaciones de tipo A y K. La salida térmica de aleaciones no compensadas isoelásticas (D) se incluye en el mismo gráfico con propósitos comparativos. En la práctica, el número STC para una galga tipo A o K, se elige lo más próximo posible al coeficiente de expansión termal de la pieza de prueba. Sin embargo, las curvas térmicas de salida para estas aleaciones, pueden ser rotadas alrededor de la temperatura de referencia ambiente para favorecer un rango de temperatura particular. Esto se hace errando el número STC y el coeficiente de expansión a propósito en la dirección apropiada. Cuando el número STC seleccionado es menor que el coeficiente de expansión, la curva es rotada en sentido contrario al de las agujas del reloj. Errando en sentido opuesto la curva es rotada en sentido de las agujas del reloj. Si el número STC es incorrecto, las curvas de salida térmica para aleaciones tipo A y K (suministradas con cada paquete de strain gages) no son aplicables, y será necesario calibrar la salida térmica de la instalación como un función de la temperatura.

### 3.12 Criterios de selección de strain gages

El rendimiento de un strain gage para cualquier aplicación se ve afectado por cualquier elemento interviniente en el diseño y manufactura de la galga. Micro-Measurements ofrece una gran variedad de tipos de galgas para cumplir con un amplio rango de medidas de esfuerzos. A pesar del gran número de variables en juego, el proceso de selección de una galga se puede resumir a sólo unos pocos pasos. Del diagrama siguiente y basándonos en el código de designación de las galgas, se pueden ver seis parámetros a seleccionar, que son:

- 1) longitud
- 2) patrón
- 3) serie
- 4) opciones
- 5) resistencia
- 6) número STC





## 1) Longitud de la galga:

De todos los parámetros a seleccionar, la longitud y patrón de la galga son los primeros en ser elegidos, basándonos en el espacio disponible para montar la galga, la naturaleza de los esfuerzos (uniaxiales, biaxiales, etc) y su gradiente.



Como una buena medida inicial, se puede elegir una galga de 3mm de longitud. Esta medida ofrece una amplia gama de posibilidades dentro de las cuales se puede elegir los restantes parámetros de galgas como pueden ser el patrón, serie y resistencia. La galga y sus almohadillas son lo suficientemente grandes como para facilitar su instalación. Al mismo tiempo, las galgas de esta longitud proveen rendimientos comparables a las de mayores longitudes.

Las principales razones como para seleccionar una galga de mayor longitud normalmente pueden ser:

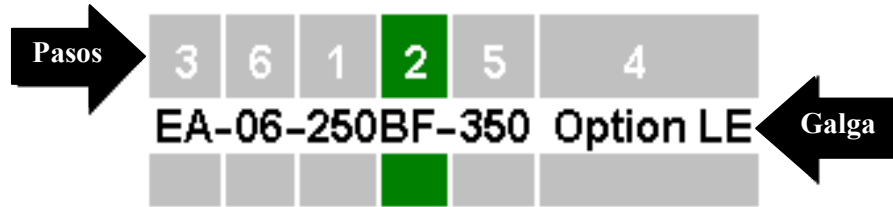
- Una mayor área de grilla para mejorar la disipación de calor.
- Mejorar la promediación del esfuerzo sobre materiales no homogéneos como pueden ser compuestos de fibra reforzados.
- Un mejor manejo e instalación (para longitudes de galgas hasta 13mm).

Por otro lado, una galga de longitud menor puede ser necesaria cuando el objeto a medir registra picos de esfuerzo como en un codo u hoyo. Esto es cierto, por supuesto, cuando las dimensiones para instalar la galga son restringidas.

## 2) Patrón de grilla:

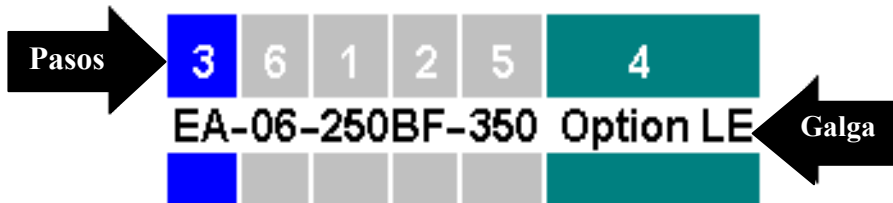
Cuando seleccionamos el patrón de grilla, la primera consideración es si elegimos una simple o si necesitamos una roseta. Las grillas simples se proveen con diferentes relaciones (longitud-amplitud) y varios tipos de almohadillas para adaptarse a las distintas instalaciones. Rosetas de dos elementos (90°), si son aplicables, se pueden

elegir con un gran número de configuraciones de grillas y almohadillas. Cuando elegimos rosetas con tres elementos (rectangular o delta), la elección primaria del patrón, una vez determinada su longitud, es entre la construcción plana o apilada.



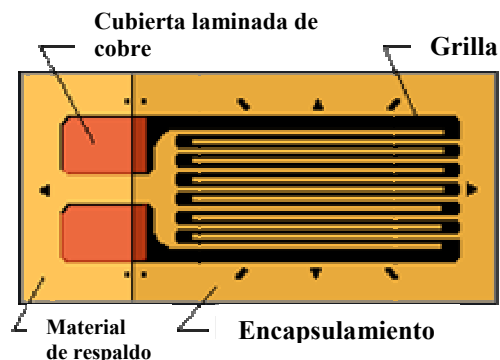
### 3) Serie de la galga:

Con la selección inicial de longitud y patrón completada, el próximo paso es seleccionar la serie de la galga, así determinaremos la combinación entre el papel metálico y el material de respaldo, y cualquier otra característica común a la serie. Ésto se realiza refiriéndose a una tabla que recomienda a una serie en particular para ciertos requerimientos especificados.



### 4) Opciones (si existen):

Si la serie de la galga tiene alguna opción en particular, debe ser especificada en esta instancia, puesto que la disponibilidad de la opción deseada sobre el patrón de galga elegido de dicha serie requiere su verificación en este paso.



### 5) Resistencia de la galga:

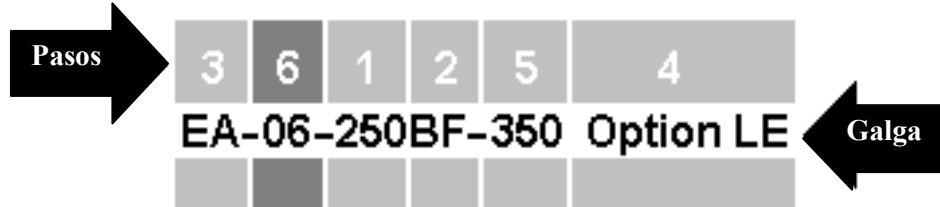
Como se puede notar de lo discutido sobre el patrón de las galgas, existen en ciertas ocasiones ventajas al seleccionar una galga de 350Ω de resistencia si ésta es

compatible con los instrumentos utilizados para realizar la medición. Esta decisión puede ser influenciada, sin embargo, por consideraciones del costo, particularmente en el caso de galgas pequeñas. Hay que tener en cuenta también, que se reduce la vida útil por fatiga para galgas de pequeñas dimensiones y altas resistencias.



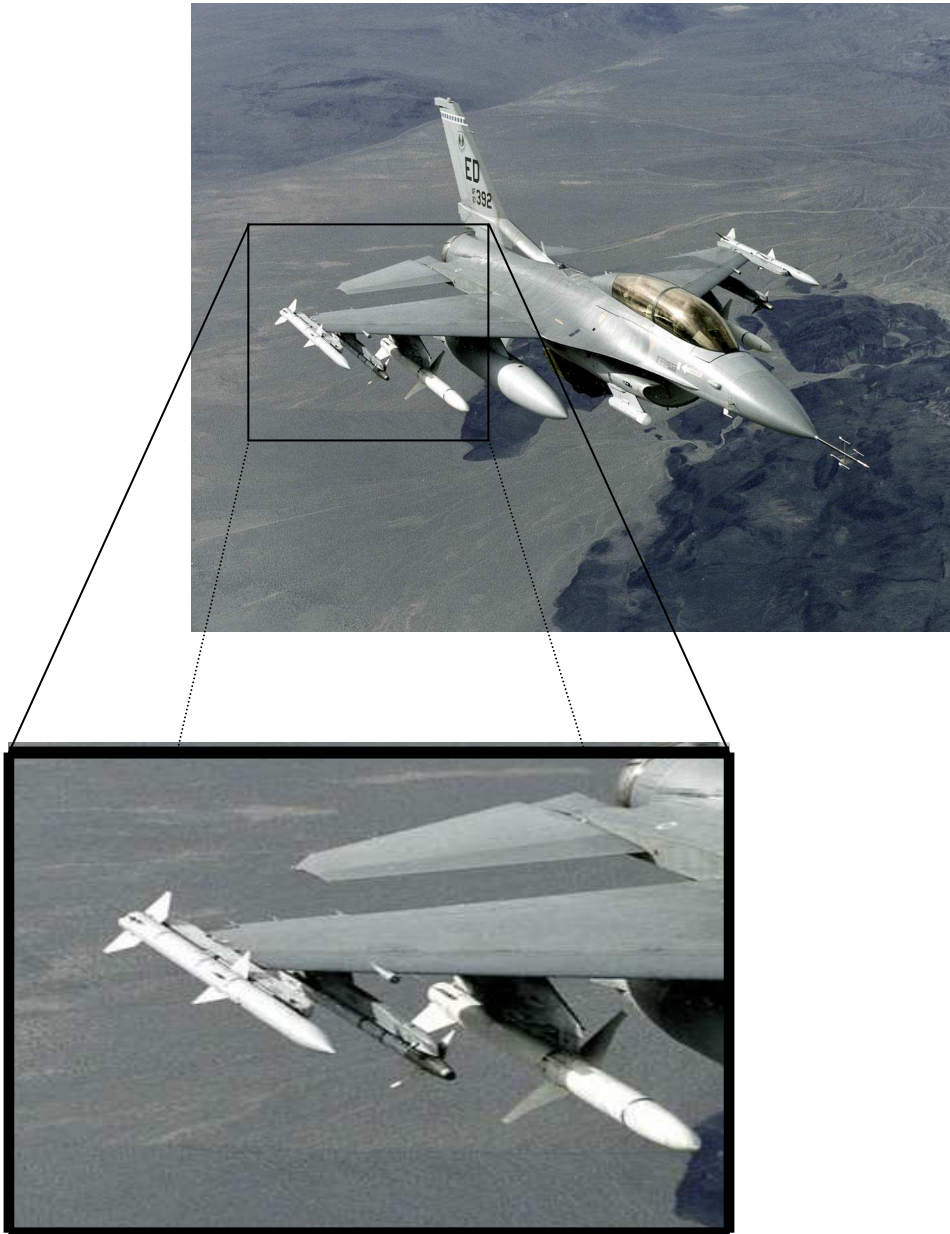
### 6) Número STC:

Finalmente, para completar la designación del strain gage, debemos elegir un número STC de entre todos los disponibles utilizando la tabla "Standard Gage Series" en conjunción del catálogo 500, de "Micro-Measurements Precision Strain Gages" .



### 3.13 Ejemplo de selección de un strain gage

Durante los vuelos de prueba de una aeronave de combate, se realizó un análisis de esfuerzos sobre una pequeña sección de sus alas de titanio, con y sin, un misil sujeto a ella. Los rangos de temperatura para la medición de esfuerzos van de los  $-55^{\circ}\text{C}$  a los  $+230^{\circ}\text{C}$ , y serán un factor determinante en la elección de la galga.



### Elección de la galga:

- **Longitud:** estudios preliminares de diseño utilizando PhotoStress® indica que una longitud de la galga de 1.6mm presenta el mejor compromiso para ver el gradiente de tensión, picos de tensión y espacio para su instalación.
- **Patrón de grilla:** con la información acerca de los estados de esfuerzo y sus principales direcciones, podemos ver que existen áreas donde se pueden utilizar galgas simples y rosetas de dos elementos tipo “Tee”. En otras partes de la aeronave, donde las principales direcciones de los esfuerzos varían con las maniobras de vuelos, se pueden utilizar rosetas rectangulares de 45°.

- **Serie:** las máximas temperaturas de operación como así también los requerimiento para medir de forma tanto estática como dinámica, indica claramente el uso de galgas con aleación para el material de grilla de tipo K. Se pueden elegir la serie SK o la WK, pero la serie WK se prefiere porque tienen pistas integradas.
- **Opciones:** para facilitar la instalación, la opción W, con terminales integrales de soldadura es ventajosa. Esta opción es aplicable a rosetas apiladas por lo que se especificada sólo para galgas de simple grilla.
- **Resistencia:** cuando es posible, como en este caso, galgas de 350Ω deben ser utilizadas debido a los beneficios que las galgas de alta resistencia implican.
- **Número STC:** las de aleaciones de titanio, con un coeficiente termal de  $8.8 \times 10^{-6} 1/^\circ\text{C}$  son ideales. Aleaciones K con número STC 05 son apropiadas.

Finalmente, combinando los resultados del procedimiento de elección, las galgas que cumplen con los requisitos pedidos pueden ser:

**WK-05-062AP-350/Option W**  
**WK-05-060WT-350**  
**WK-05-060WR-350**

### 3.14 Como afecta la temperatura a la precisión de un strain gage

En las pruebas y mediciones mecánicas, es importante entender como un objeto reacciona a varias fuerzas. Cuando uno mide esfuerzo, uno mide la cantidad de deformación que un cuerpo sufre debido a las fuerzas aplicadas, usando un strain gage. Lo primero que se hace es disponer al strain gage sobre la pieza de prueba, aplicar la fuerza y medir el esfuerzo detectando cambios en resistencia. Idealmente, nos gustaría que la resistencia del strain gage varíe sólo con la fuerza aplicada. Sin embargo, los materiales del strain gage, las pistas de cobre y la pieza de prueba a la que la galga se encuentra sujeta también responden a cambios de la temperatura. Los efectos relacionados con la temperatura son los principales causantes de errores de medición de esfuerzos.

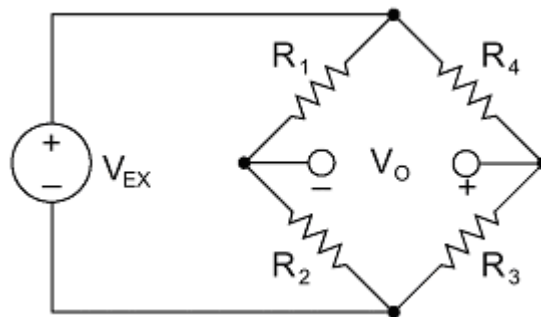
#### Mediciones con strain gages

En la práctica, las mediciones con strain gages raramente involucran cantidades mayores que unos pocos milistrain (mε). Por lo tanto, para medir esfuerzo se requiere de máxima precisión sobre pequeños cambios de resistencia. El factor de galga es, como se dijo, la sensibilidad al esfuerzo de un strain gage. Supongamos que una pieza de prueba sufre un esfuerzo de 500με. Un strain gage con un factor de galga de 2 mostrará un

cambio en su resistencia eléctrica de  $2 \cdot (500 \cdot 10^{-6}) = 0.1\%$ . Para una galga de  $120\Omega$ , es un cambio sólo de  $0.12\Omega$ . Para medir cambios tan pequeños de resistencia y compensar la sensibilidad térmica, los strain gages son casi siempre utilizados en configuración puente con excitación externa.

El circuito general de puente de Wheatstone, consiste en cuatro brazos resistivos con una excitación de voltaje,  $V_{EX}$ , que se aplica a través del puente. El voltaje de salida del puente,  $V_o$ , es igual a:

$$V_o = \left[ \frac{R_3}{R_3 + R_4} - \frac{R_2}{R_1 + R_2} \right] \cdot V_{EX}$$



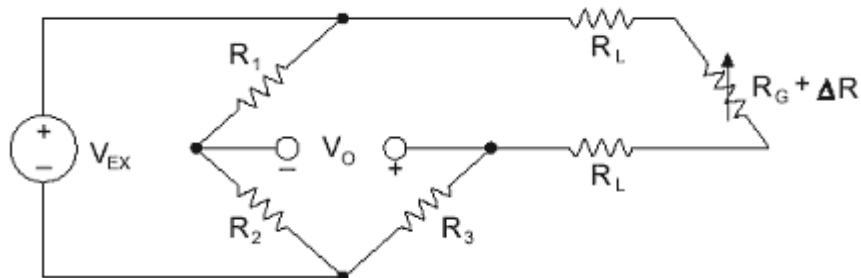
**Figura 3.6 Puente de Wheatstone**

De la ecuación anterior, cuando se da que  $R_1 / R_2 = R_4 / R_3$ , el voltaje de salida  $V_o$  es nulo. Bajo estas condiciones, se dice que el puente se encuentra *balanceado*. Cualquier cambio de resistencia sobre cualquier brazo del puente, resultará en una salida del voltaje no nula. Por lo que si reemplazamos  $R_4$  con un strain gage activo, cualquier cambio en la resistencia del strain gage causará el desbalance del puente y producirá una salida no nula proporcional al esfuerzo.

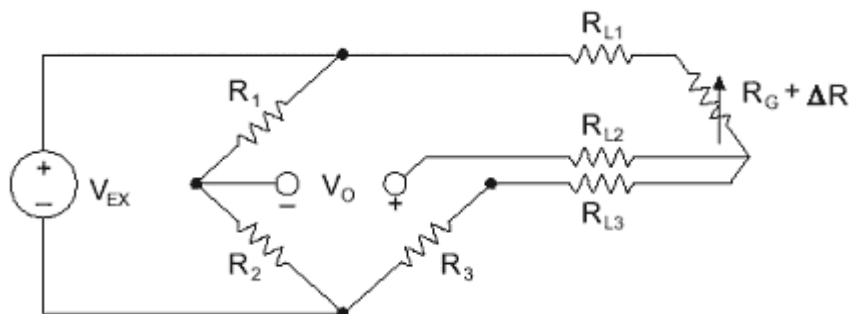
## Prevención de errores causados por las pistas de cobre

La resistencia de las pistas de cobre también varía con la temperatura, y puede tener un gran efecto en la precisión de una medida con un strain gage. Aún cuando se haya balanceado inicialmente el puente, cambios en dichas resistencias pueden introducir grandes errores en mediciones estáticas. Esto puede ocurrir aún siendo estas resistencias mucho menores a del puente, lo cual no sorprende si consideramos que el coeficiente de temperatura del cobre es dos ordenes de magnitud mayor que el coeficiente de temperatura de las galgas.

Aunque se podría conectar la galga con dos cables a un circuito de cuarto de puente, el “drift” causado por el cambio de temperatura de las pistas, sería enorme. Por estas razones uno realiza mediciones estáticas utilizando un circuito de tres cables, mostrado en la figura. El puente se mantiene balanceado mientras la resistencia de las pistas  $R_L$  siga la temperatura.



a) Conexión de dos cables



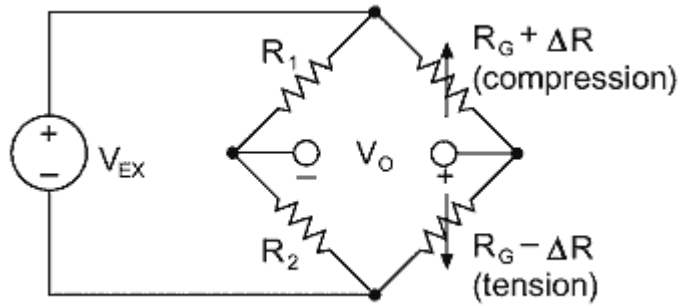
b) Conexión de tres cables

**Figura 3.6 Conexiones de dos y tres cables para sensores de cuarto de puente**

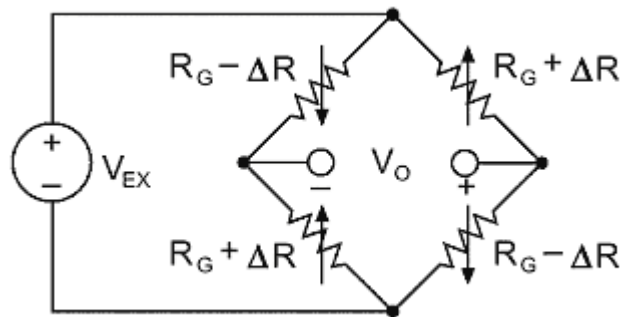
### **Minimización de los efectos de la temperatura con sensores en medio puente y puente completo**

Si utilizamos dos o cuatro galgas sobre un puente de Wheatstone, podemos minimizar los efectos de la temperatura. Estas configuraciones son conocidas como medio puente y puente completo, respectivamente. Con todos los strain gages sobre el puente a la misma temperatura y montados sobre el mismo material, cualquier cambio en la temperatura afectará a todas las galgas de la misma manera. Puesto que los cambios de la temperatura son idénticos en todas las galgas, la relación de sus resistencias no varía, y el voltaje de salida de cada galga tampoco. La manera más fácil

para corregir las variaciones causadas por la temperatura (“drift”) es mediante la utilización de configuraciones de medio puente y puente completo.



**Figura 3.7 Configuración de medio puente**



**Figura 3.8 Configuración de puente completo**