

## **Medida de magnitudes mecánicas**

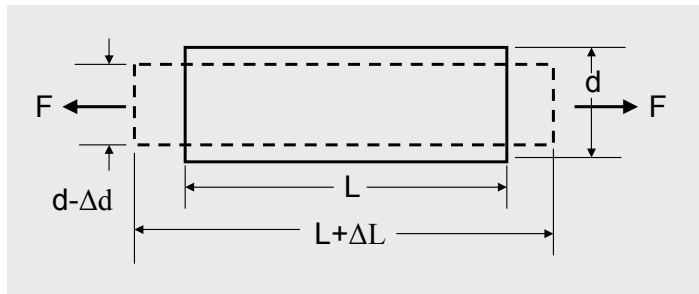
- **Introducción**
- **Sensores potenciométricos**
- **Galgas extensiométricas**
- **Sensores piezoeléctricos**
- **Sensores capacitivos**
- **Sensores inductivos**
- **Sensores basados en efecto Hall**
- **Sensores optoelectrónicos**
- **Sensores de ultrasonidos**

## 5.1 Introducción

---

Posición	Inductivos, Resistivos, Magnéticos, Efecto Hall
Velocidad	Efecto Hall, Encoder, Potenciómetros
Aceleración	Piezoeléctricos, Piezorresistivos, Capacitivos
Fuerza, Peso	Celdas de carga, Galgas
Presión	Inductivo, Capacitivo, Piezoeléctrico, Galga, Óptico
Caudal	Electromecánicos, Magnéticos, Ultrasonidos
Nivel	Potenciómetros, Capacitivos, Térmicos, Ópticos

### 5.3 Galgas extensométricas



$$R = \rho \frac{L}{\pi d^2 / 4} \quad (1)$$

$$\frac{\Delta R}{R} = \frac{\Delta \rho}{\rho} + \frac{\Delta L}{L} - 2 \frac{\Delta d}{d} \quad (2)$$

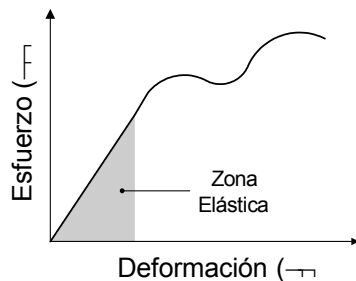
11

Las galgas extensométricas (*strain gauges*) son sensores resistivos muy utilizados en la medida de esfuerzos mecánicos en materiales en los que la resistencia efectiva entre sus extremos se modifica con el esfuerzo aplicado sobre la galga.

Para comprender su funcionamiento, veremos en qué principios se basa el cambio de la resistencia con la fuerza aplicada. Supongamos que se aplica una fuerza F de tracción a los extremos de un hilo de material homogéneo de longitud L y diámetro d. El material se deformará elásticamente. En principio, se modificarán las dimensiones produciéndose un alargamiento del hilo y una disminución de su sección que ocasionará un cambio en la resistencia efectiva del hilo, como se muestra en la ecuación (2). El cambio en la resistencia puede deberse a:

- El propio cambio de longitud.
- El cambio originado en la sección.
- El cambio originado en la resistividad.

## Factor de galga



▪ Esfuerzo:  $\sigma = \frac{F}{A}$  (3)

▪ Deformación:  $\varepsilon = \frac{\Delta L}{L}$  (4)

▪ Módulo de Young:  $E = \sigma / \varepsilon$  (5)

▪ Factor de galga:  $K = \frac{\Delta R/R}{\Delta L/L} = \frac{\Delta R/R}{\varepsilon}$  (6)

$$\Delta R = KR\varepsilon = \frac{KR}{EA}F \quad (7)$$

12

El factor de galga  $K$  determina la sensibilidad de la resistencia a los cambios en la longitud. Así, la sensibilidad de la galga crece con el factor de galga y el valor de la resistencia y decrece con el módulo de Young y con la sección. Para lograr mayores cambios en  $\Delta R$ , será conveniente incrementar el valor de la resistencia sin incrementar la sección, es decir, tener mayores longitudes; por otro lado, si lo que interesa es medir en una zona muy concreta, el tamaño no puede ser muy grande con lo que se impone una solución en la que el hilo se disponga en zig-zag y se sitúe sobre una película que transmita lo mejor posible el estado tensional al propio hilo.

## Tipos de galgas

Parámetro	Metálicas	Semiconductoras
Margen de medida, $\mu\epsilon$	0,1 a 40.000	0,001 a 3000
Factor de galga	1,8 a 2,35	50 a 200
Resistencia, $\Omega$	120, 350, 600...5000	1000 a 5000
Tolerancia en la resistencia, %	0,1 a 0,2	1 a 2
Tamaño, mm	0,4 a 150	1 a 5

13

▪ **Galgas metálicas:** para su fabricación se emplean diversos conductores metálicos, como las aleaciones constantán, karma, isoelestatic y aleaciones de platino. Pueden ser de:

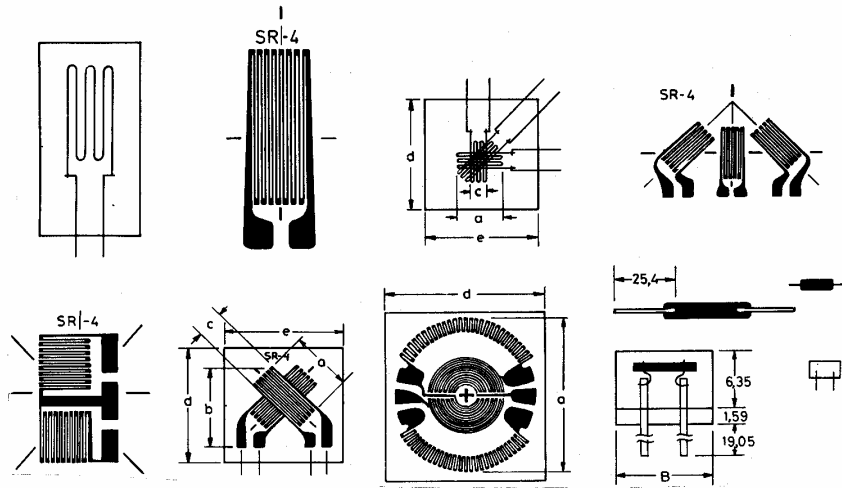
- Hilo metálico. Son las más sencillas. Normalmente están adheridas a una base de dimensiones estables. Introducen errores en la medida ante estados tensionales no longitudinales.

- Película metálica. Son las que se desarrollan por métodos de fotograbado. Se fabrican de forma similar a la producción de circuitos impresos en bases flexibles.

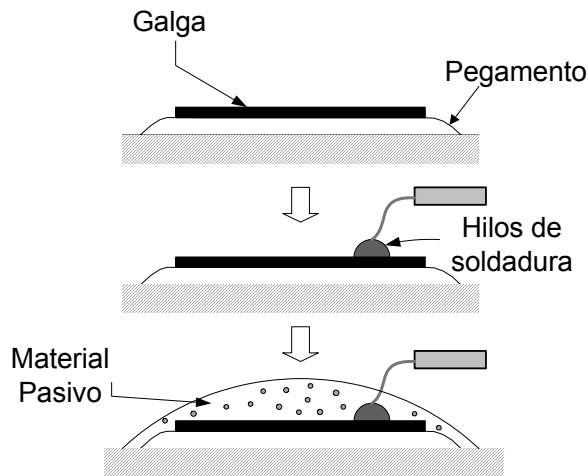
- Metal depositado. Son las aplicadas directamente sobre superficies mediante métodos de evaporización o bombardeo químico. Se usan en los diafragmas de los sensores de presión.

▪ **Galgas semiconductoras:** se fabrican de silicio u otro material semiconductor. Su cambio resistivo es menos lineal que las de metal y tienen una gran dependencia de la temperatura. Se usan en la fabricación de sensores integrados de presión donde se implantan en microdiafragmas para medir presión.

## Tipos de galgas



## Modo de empleo

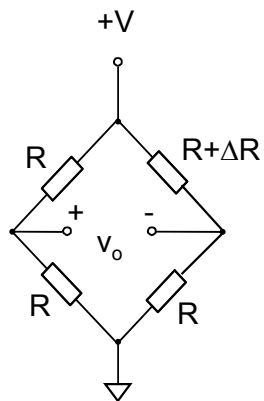


15

Para la correcta utilización de las galgas se debe de tener en cuenta lo siguiente:

- a) Las galgas solo miden en una dirección, por lo que cuando se colocan se debe tener cuidado de alinearlas teniendo en cuenta las marcas de alineación que presentan.
- b) Solo proporciona la medida del estado tensional de la superficie que ocupa la galga, no el de toda la superficie.
- c) Si se desconoce la dirección de la tensión a que estará sometida la galga se podría utilizar dos galgas dispuestas en la misma zona ortogonalmente.
- d) La transmisión del esfuerzo de la superficie en que se va a medir hasta el metal debe de realizarse sin pérdida de información, por lo que el sistema debe garantizar la no absorción del esfuerzo. Para ello se emplean pegamentos de gran resistencia mecánica que permiten un óptimo funcionamiento. También se debe tener una cierta precaución en la “pasivación” de la superficie expuesta mediante una capa de material que la proteja frente a inclemencias ambientales.

## Circuitos de medida



$$v_o = V \left( \frac{1}{2} - \frac{R}{R + (R + \Delta R)} \right) = V \frac{\Delta R}{4R + 2\Delta R}$$

- Como  $4R \gg 2\Delta R \Rightarrow$

$$v_o @ V \frac{\Delta R}{4R} = V \frac{K\epsilon}{4}$$

- Sensibilidad del puente:

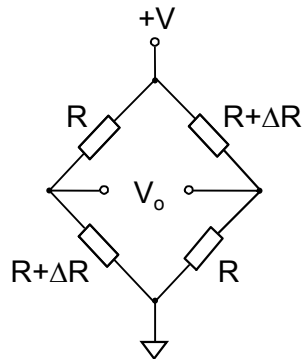
$$S_p = \frac{dv_o}{d(\Delta R)} @ \frac{V}{4R}$$

Para la medida de los cambios producidos por las galgas extensiométricas se utiliza la configuración en puente de Wheatstone. Como hemos visto este tipo de configuración es muy sensible a pequeños cambios en las resistencias del puente.

La figura muestra el puente de medida más sencillo, con solo una galga activa. El análisis del circuito se lleva a cabo asumiendo que todas las resistencias son iguales cuando no hay deformación. La tensión de salida del puente es muy pequeña y deberá ser amplificada por un amplificador de instrumentación.

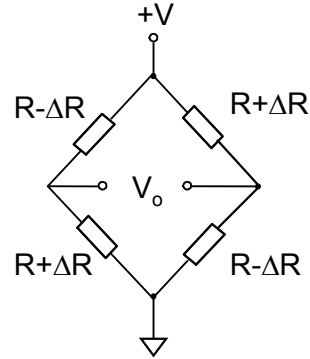


## Circuitos de medida



$$v_o @ V \frac{\Delta R}{2R} = V \frac{K\varepsilon}{2}$$

$$S_p = \frac{V}{2R}$$



$$v_o @ V \frac{\Delta R}{R} = VK\varepsilon$$

$$S_p = \frac{V}{R}$$

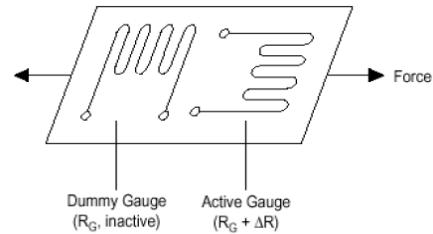
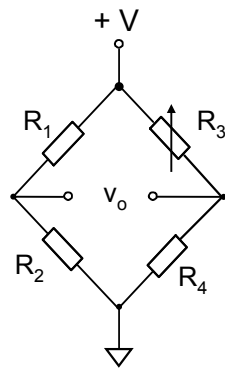
17

Se puede duplicar la sensibilidad en el voltaje de salida disponiendo dos galgas activas (montaje de  $\frac{1}{2}$  puente) como se muestra en el montaje de la izquierda. Las dos galgas han de estar sometidas al mismo tipo de esfuerzo.

Si se puede trabajar con estados tensionales “opuestos” pero iguales en valor absoluto es posible disponer cuatro galgas activas, dos trabajando a tracción y dos a compresión con lo que se duplica la sensibilidad del sistema y al tensión de salida será:  $v_o = VK\varepsilon$ , con cuatro veces más sensibilidad que el montaje original. Claro está que esta posibilidad sólo se podrá llevar a cabo cuando existan estados tensionales opuestos en la zona de medida que lo permitan. Aún en este caso, la utilización de las galgas debe hacerse con sumo cuidado para conseguir que realmente dos de ellas soporten una elongación positiva y las otras dos la soporten negativa y del mismo valor.

## Compensación de la temperatura

➤  $50 \mu\epsilon/^{\circ}\text{C}$

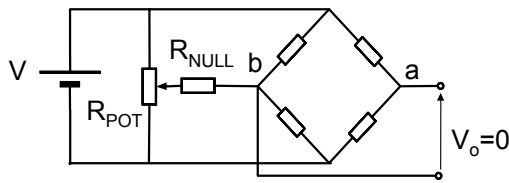


▪ En equilibrio ( $v_o=0$ )  $\Rightarrow R_1 \times R_4 = R_2 \times R_3$

18

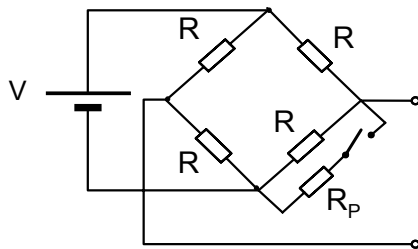
Las galgas son bastante sensibles a la temperatura (hasta  $50 \mu\epsilon/^{\circ}\text{C}$ ), por lo que se suelen compensar mediante una galga pasiva conectada en la misma rama que la activa y físicamente próxima a ella, de forma que se encuentre a su misma temperatura, pero no sometida a esfuerzos. En el ejemplo de la figura si  $R_3$  es la galga activa,  $R_4$  sería la galga de compensación.

## Equilibrado y calibración



### ▪ Equilibrado:

Se equilibra el puente mediante  $R_{POT}$  y  $R_{NULL}$  hasta que  $V_o = 0V$



### ▪ Calibración (mediante shunt)

Se coloca una resistencia de precisión  $R_p$  que simule una deformación:

$$\epsilon_{ficticia} = \frac{R}{K(R + R_p)}$$

19

La utilización de los puentes de medida con galgas hay que tener en cuenta diversos aspectos:

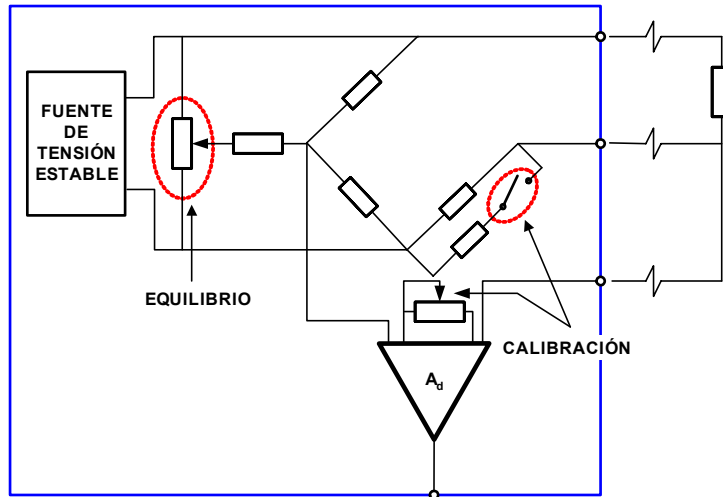
**1) Equilibrado del puente.** En ausencia de esfuerzos, la tensión de salida del puente debe ser nula. Se ajusta con el potenciómetro  $R_{POT}$  y  $R_{NULL}$ .

**2) Calibración del puente.** La calibración consiste en situar un valor de deformación conocido y comprobar si la salida se acerca o no al valor previsto. Como situar un estado de deformación determinado puede no ser algo sencillo de hacer se coloca una resistencia  $R_{SH}$  en paralelo con la galga activa. La deformación que simula esa resistencia está dada por la expresión de la figura. La resistencia del interruptor ha de ser muy baja, se recomienda el uso de relés encapsulados al vacío.

**3) Cableado del puente.** En muchas ocasiones el puente no está en el mismo lugar que las galgas, por lo que las resistencias del cableado pueden afectar a la medida. Este efecto puede compensarse equilibrando el puente antes de utilizarlo para medir.

**4) Variación de la resistencia del cable con la temperatura.** En este caso se puede efectuar una medida a tres hilos.

## Medida de deformación en punto



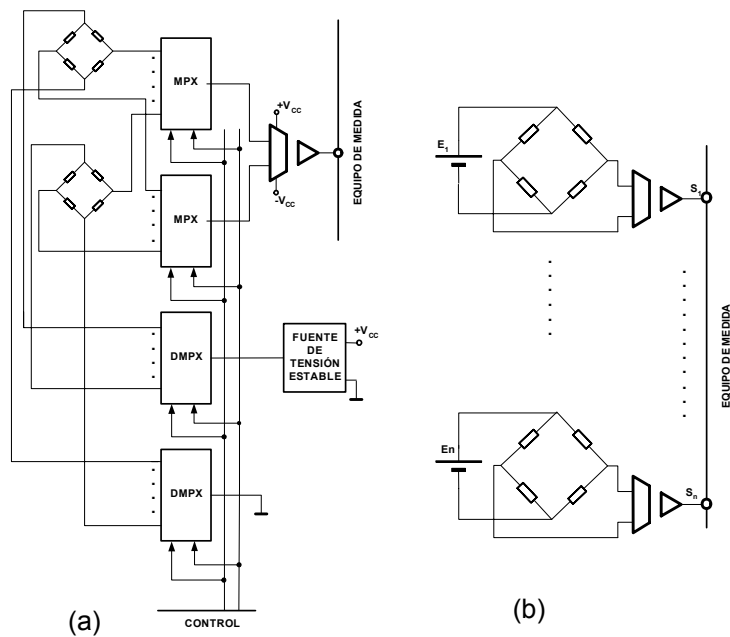
20

Las aplicaciones de las galgas extensométricas pueden clasificarse en dos grandes grupos: en primer lugar, las que suponen la medida directa de un estado de deformación en una superficie que permitirá conocer su estado tensional; en segundo lugar, aquéllas en las que el estado de deformación es una variable intermedia consecuencia de la variable que se pretende medir.

Las medidas estáticas de estados de deformación son medidas en las que se supone que los cambios de los estados de deformación ocurren con lentitud y, por ello, no será preciso cuidar la respuesta en frecuencia de los amplificadores y se podrá utilizar filtros paso bajo con frecuencias de corte bajas para limitar la presencia de señales de ruido de alta frecuencia que pueden aparecer. Este tipo de medidas corresponden a sistemas de monitorización de elementos de sustentación en construcción o en cualquier tipo de máquina que no esté sometida a estados vibracionales o de fatiga.

Dentro de los sistemas de medida de estados de deformación mediante galgas extensométricas se tienen los casos de sistemas en que se pretende medir un único estado con una variable y que incluirán un único puente con los accesorios adicionales para el ajuste del cero y la calibración. Este tipo de sistema corresponde directamente a lo que se ha descrito hasta este momento y supone una amplificación posterior hasta llevar la tensión de salida a los valores que se desee.

## Medida de deformación en múltiples puntos



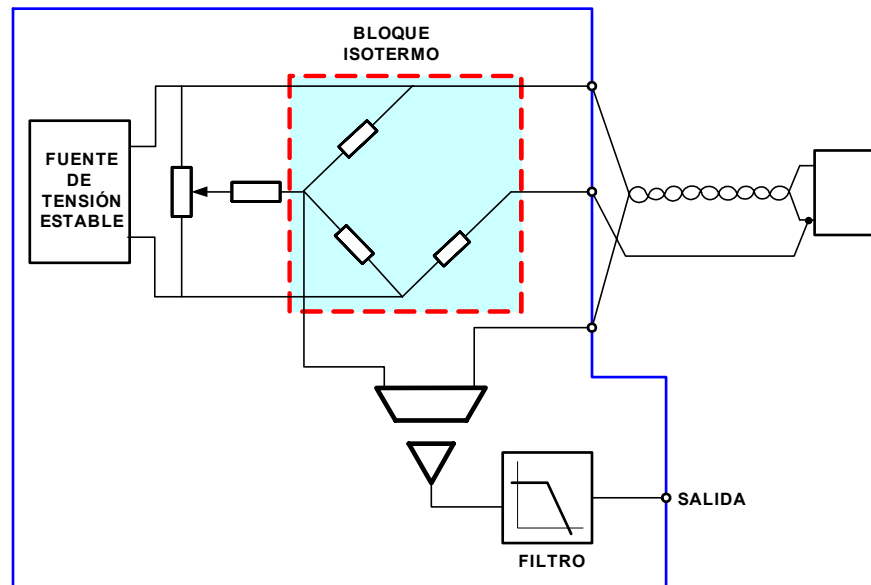
21

Sin embargo, la situación más normal es la medida de los estados de deformación en varios puntos simultáneamente lo que implica el uso de diferentes canales para la medida. En algunos casos, tales como los sistemas de monitorización de los procesos de construcción de grandes edificios o infraestructuras viarias, el número de variables de deformación monitorizadas puede llegar a ser muy grande (cientos de canales) y los equipos de medida pueden realizarse de dos formas:

Mediante un único amplificador y un multiplexador que vaya recorriendo los distintos puentes de medida de forma secuencial (figura a). Se tiene así un ahorro de equipamiento ya que los amplificadores aislados de instrumentación y las fuentes de alimentación ultra-estabilizadas suelen tener un coste alto. El inconveniente está en la imposibilidad de realizar medidas simultáneas aunque esto es menos importante en medidas estáticas.

Mediante fuentes y amplificadores independientes para cada puente de medida con un coste muy alto, pero una garantía de simultaneidad total y la posibilidad de realizar ajustes particulares para cada uno de ellos (figura b).

## Medidas dinámicas



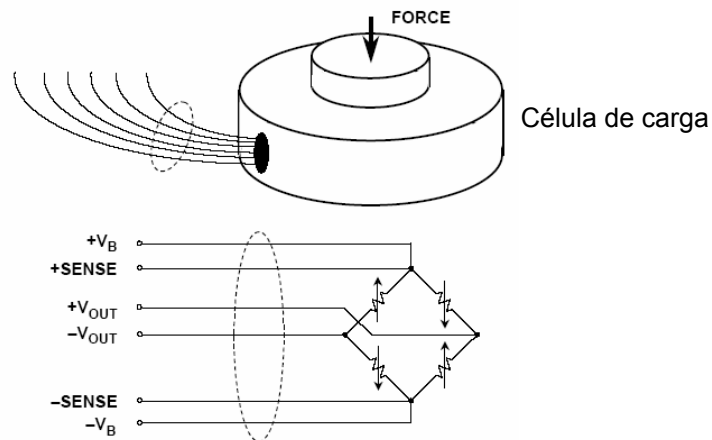
22

Cuando el objetivo es conocer la evolución en el tiempo (o en frecuencia) de los estados de deformación en uno o varios puntos de una pieza o sistema mecánico, es necesario realizar medidas dinámicas que recojan este tipo de información. Las galgas pueden tener buenas características dinámicas por lo que el cuello de botella de este tipo de sistemas suele estar en el producto ganancia – ancho de banda del amplificador que se convierte en un equipo de alto coste. Con vistas a optimizar la relación S/N se incluirán filtros a la salida del amplificador para limitar el ancho de banda al estrictamente necesario para el trabajo a realizar y evitar el procesamiento de tensiones fuera de las frecuencias deseadas. En la figura se muestra un ejemplo de este tipo de sistemas.

Los sistemas comerciales de este tipo suelen incluir filtros de frecuencia de corte variable, adaptables a las necesidades de cada caso, amplificadores aislados con las prestaciones para ajustar el cero y la calibración mediante resistencia de *shunt* y fuentes ultra-estabilizadas para alimentar el puente.

A la hora de diseñar estos sistemas, se deberá tener en cuenta el tipo de aplicación a la que van destinados con lo que si se pretende realizar medidas de vibración prestaremos especial atención a los parámetros de alterna de los amplificadores utilizados mientras que en medidas de fatiga, de impacto o en la que se mezclen las condiciones estáticas y dinámicas, habrá que considerar todas las características de los amplificadores con lo que el problema puede llegar a complicarse en gran medida.

## Medida de peso

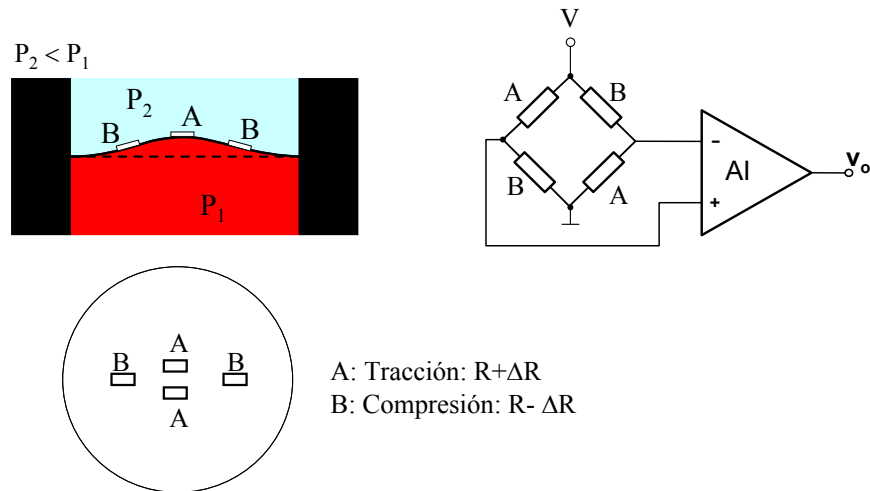


- Margen de medida:  $500 \div 2000 \mu\epsilon$ .
- Pesaje de tanques, silos y grades pesos industriales.

Hay muchas variables que pueden producir estados de deformación en una pieza con lo que las galgas extensométricas se pueden usar para medir esta variable intermedia y, así, poder medir la original. Las aplicaciones más importantes son: la medida de peso y la medida de presión.

Las células de carga (o celdas de carga) son piezas mecánicas con configuración muy variada que se han diseñado de tal forma que en algunas partes de su estructura mecánica, el peso aplicado se transforma en una deformación proporcional que se mide con dos o cuatro galga.

## Medida de presión



24

La **medida de presión** se realiza mediante un sistema de membrana que transforma la diferencia de presión entre sus dos caras en una deformación que se mide mediante un puente de cuatro galgas en el que dos trabajan a tracción y dos a compresión, tal como se muestra en la figura.

La dificultad de este tipo de sistemas está en la previsible no-linealidad entre la diferencia de presiones y el estado de deformación que obliga a un diseño muy cuidadoso de la membrana, en cuanto a materiales (metálicos, cerámicos, plásticos, etc.) y morfología, y una selección correcta de los lugares en los que se van a situar las galgas. De todas formas, la no linealidad se puede paliar mediante un microcontrolador que incorpore una tabla de calibración del conjunto.



## Ejemplos



Célula de carga

