



UNIVERSIDAD CENTRAL "MARTA ABREU" DE LAS VILLAS
VERITATE SOLA NOBIS IMPONETUR VIRILISTOGA. 1948

Departamento de Ingeniería Mecánica

TRABAJO DE DIPLOMA

MONTAJE DE PRÁCTICA DE LABORATORIO
SOBRE EXTENSOMETRÍA UTILIZANDO
ROSETAS DE DEFORMACIÓN.

Autor: Sandy Marcelo Ferreira.

Tutor: Dr. Luis I. Negrín Hernández.

Curso 2015-2016

Pensamiento

“El hombre inteligente no es el que tiene muchas ideas, sino el que sabe sacar provecho de las pocas que tiene.”

Emile Chartier

Dedicatoria

Este Trabajo de Diploma está dedicado a mis padres por brindarme su amor, preocupación, apoyo incondicional durante estos 5 años de universidad.

A mi tío, mis hermanas y primos por su confianza en el logro de mis objetivos y aspiraciones.

A mis demás familiares y amigos por darme la fortaleza de seguir adelante en mis propósitos.

A mi tutor por ser mi guía ante lo desconocido y en general a todo el claustro de profesores que de una forma u otra intervinieron de forma positiva en mi superación profesional.

Resumen

En el presente trabajo se realiza el montaje y puesta a punto de una práctica de laboratorio para la medición de tensiones utilizando la extensometría eléctrica. En esta práctica se utiliza una roseta de deformaciones recta, es decir con las galgas colocadas a 90° . Se establecieron los parámetros de la práctica: la resistencia de la roseta, en este caso de 120Ω , el voltaje de entrada de 1 V y la ganancia del equipo de medición que debe ser de 100. Finalmente se da la guía para la realización de la práctica que puede ser realizada en las asignaturas Resistencia de Materiales en pregrado y teoría de la Elasticidad en postgrado.

Abstract

Presently work is carried out the assembly and setting about to a laboratory practice for the mensuration of tensions using the electric extensometry. In this practice a rectangular rosette of deformations is used, that is to say with the extensometer placed at 90° . The parameters of the practice settled down: the resistance of the rosette, in this case of 120Ω , the voltage of entrance of 1 V and the gain of the mensuration team that it should be of 100. Finally the guide is given for the realization of the practice that can be carried out in the subjects Resistance of Materials in pregrade and theory of the Elasticity in graduate degree.

Índice

Introducción.....	1
Capítulo 1: Fundamentos de la extensometría.....	3
1.1. Evolución de la Extensometría.....	3
1.2. Definición de banda o galga extensométrica.....	8
1.3. Tipos de galgas extensométricas.....	8
1.4. Principio de funcionamiento de las galgas extensométricas.	10
1.5. Circuito de medida de las galgas.	12
1.6. Selección y compromiso de selección de la galga extensométrica.....	13
1.7. Limitaciones de las galgas extensométricas.	14
1.8. Ventajas de las galgas extensométricas.	14
1.9. Desventajas de las galgas extensométricas.	14
1.10. Aplicaciones de las galgas extensométricas.....	15
1.11. Fundamentos teóricos de las galgas tipo roseta.	15
1.11.1. Roseta.....	15
1.12. Tipos de Roseta.....	16
1.12.1. Roseta rectangular.	16
1.12.2. Roseta delta.	16
1.13. Análisis de Rosetas.....	17
1.14. Geometría de la roseta.....	18
1.15. Ejemplo de ubicación de la roseta.	18
Conclusiones parciales.....	19
Capítulo II: Montaje de práctica de laboratorio de medición de tensiones con rosetas de deformación.....	20
2.1. Selección de la resistencia de la galga.	20
2.2. Selección del voltaje de entrada.	20
2.3. Preparación de la práctica.....	21

2.4. Unidades utilizadas en la medición de la deformación.....	22
2.5. Determinación de la ganancia del equipo.	24
Conclusiones parciales.....	46
Capítulo III. Guía para la realización del laboratorio.....	47
3.1. Introducción.....	47
3.2. Guía para la realización del laboratorio.....	47
Conclusiones parciales.....	58
Conclusiones generales	59
Recomendaciones.....	60
Bibliografía	61

Introducción

La determinación experimental de las tensiones producidas en una pieza en servicio se realiza en dos pasos consecutivos: medida de las deformaciones creadas por tensiones en la superficie del elemento y cálculo de las tensiones a partir de las deformaciones medidas. La técnica experimental más utilizada para medir las deformaciones en el primer paso del proceso descrito es la *Extensometría*. La aplicación de la extensometría en la comprobación de seguridad y el seguimiento de la vida de elementos estructurales se ha incrementado notablemente en los últimos años ya que la medición experimental de deformaciones se ha vuelto esencial para la determinación de su distribución en estructuras complejas, o para comprobar la validez de los resultados obtenidos mediante técnicas computacionales. [1]

El método habitual para evaluar las partes estructurales de máquinas, edificios, vehículos, aviones, etc. (generalizando: de componentes) se basa en los cálculos de la resistencia de materiales.

Este método resulta adecuado mientras se conocen el tipo y la magnitud de la carga que actúa sobre el componente. Los problemas surgen sobre todo cuando la carga es desconocida o solo se puede obtener aproximadamente. Antiguamente el riesgo de sobrecarga se contrarrestaba aumentando los márgenes de seguridad, es decir, sobredimensionando los componentes. Sin embargo, en la actualidad las estrategias de diseño exigen el ahorro de materiales, en parte por razones económicas, en parte para reducir peso. Para poder cumplir con los requisitos de seguridad y para proporcionar una duración adecuada a los componentes, es imprescindible conocer las tensiones a las que están sometidos. Por tanto es necesario realizar mediciones en condiciones de servicio. [2]

En todos los campos donde se requieren mediciones precisas de fuerzas se pueden encontrar las galgas, teniendo una amplia gama de aplicaciones ya sea a nivel industrial o de investigación ingenieril.

La selección de la galga adecuada es el primer y más importante paso a seguir antes de realizar cualquier tipo de estudio con galgas extensométricas. Generalmente se suele considerar que la selección de una galga es simple y sin

grandes implicaciones, pero es todo lo contrario; la selección racional de las características de la galga y sus parámetros pueden ser muy importantes en:

-La optimización del rendimiento de la galga para condiciones de operaciones específicas.

-La adquisición de mediciones más confiables y precisas.

Existen diversos tipos de galgas y se clasifican de acuerdo a los siguientes aspectos:

-Material constitutivo

-Forma de colocación

-Geometría

Dentro de este último aspecto se encuentra las de tipo roseta. Esta se deriva de la forma original de las bandas múltiples con varias rejillas en forma de estrella cruzadas sobre un mismo soporte; ahora se emplea para todas las bandas múltiples cuyos ejes de rejilla se entrecruzan. Originalmente era necesario colocar las rejillas cruzadas debido a la gran longitud de las mismas, aunque hoy en día aún se emplean ocasionalmente.

Objetivo general

- Realizar el montaje y puesta a punto de una práctica de laboratorio para la medición de tensiones utilizando rosetas de deformación.

Objetivos parciales

- Análisis del estado del arte sobre extensometría eléctrica.
- Realizar el montaje y puesta a punto de una práctica de laboratorio sobre la medición de tensiones utilizando rosetas de deformaciones para la asignatura Resistencia de Materiales.
- Confeccionar la Guía de Laboratorio.

Capítulo 1: Fundamentos de la extensometría.

1.1. Evolución de la Extensometría.

En sus comienzos se empleaban complicados dispositivos mecánicos para las mediciones de la deformación, que mostraban la deformación utilizando relaciones de palanca de mil o incluso más. La **figura 1.1** muestra un ejemplo.

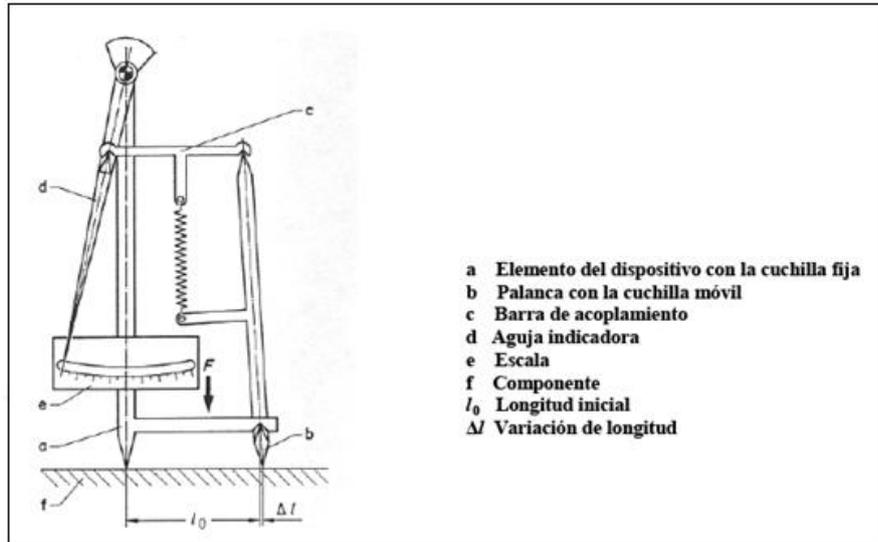


Figura 1.1. Tensómetro de Huggenberger con mecanismo de doble palanca.

Durante mucho tiempo este tipo de instrumento fue el único método disponible para realizar las mediciones extensométricas necesarias para el análisis de tensiones. A pesar de su diseño ingenioso y de la precisión de su fabricación, tenían desventajas intrínsecas que limitaron su rango de aplicación y redujeron su importancia [3]:

- Únicamente se pueden medir procesos estáticos
- Se precisan fuerzas elevadas de su fijación para evitar que resbalen en caso de vibraciones.
- La muestra debe estar fija respecto al observador.
- El tamaño de los dispositivos limita su uso en los componentes pequeños y en algunos casos la medición resulta imposible.
- La base de medición relativamente larga únicamente proporciona resultados correctos si en ella la tensión está distribuida de forma uniforme.
- Las condiciones locales pueden ser imposibles para el observador.
- El registro automático de la medición no es posible.

En la segunda mitad de los años treinta se prestó atención a un efecto mencionado por *Charles Wheatstone* en su primera publicación de 1843 sobre el circuito que había inventado. Este efecto es la variación de la resistencia de un conductor eléctrico provocada por la acción de una tensión mecánica. El modelo eléctrico está conformado de cuatro resistencias en un circuito cerrado, en donde una de las resistencias es la que se quiere evaluar siendo esta la resistencia bajo media. Este se utiliza con el fin de medir la resistencia mediante el equilibrio de los brazos del puente. Sir Charles Wheatstone fue un científico e inventor británico que durante la época victoriana realizó una gran contribución con sus inventos, de los cuales el más significativo es el puente de Wheatstone, pero además trabajo en otros inventos como el Estereoscopio, la técnica Playfair de codificación, y el caleidófono. *William Thomson* (1824-1905, desde 1892 *Lord Kelvin*) fue más lejos en un trabajo publicado en 1856.

Existen varias razones por las que pasaron más de 80 años antes de la aplicación técnica de este fenómeno. La variación de la resistencia de un hilo bajo tensión es muy pequeña. Para su medición *Thomson* usaba galvanómetros altamente sensibles que eran inapropiados para un empleo generalizado o para su uso en la industria. Además sólo son adecuados para medir procesos estáticos. No fue hasta el desarrollo de los amplificadores electrónicos que se establecieron las condiciones necesarias.

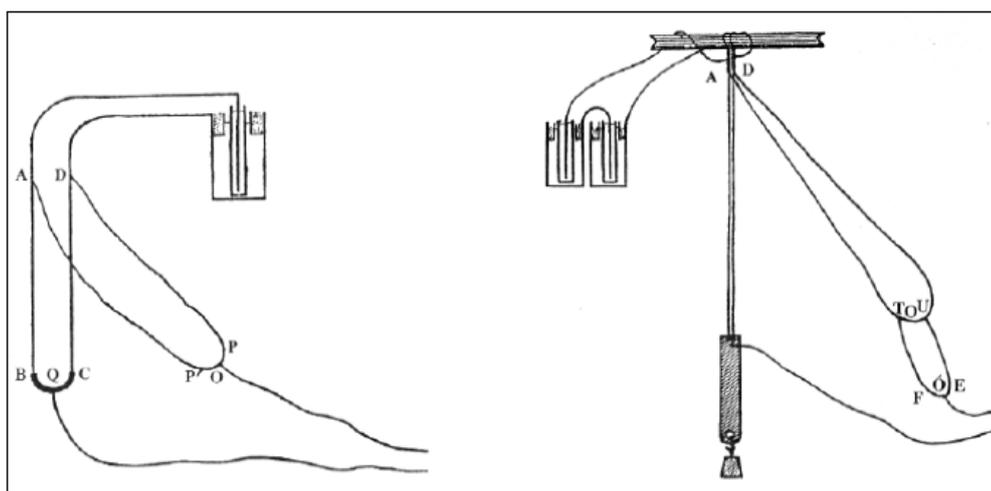


Figura 1.2. Experimento según *William Thomson* para investigar la variación de la resistencia de un conductor eléctrico bajo tensión.

Durante el año 1938 en los EEUU dos personas investigaron, casi al mismo tiempo pero de forma independiente, la idea de aprovechar el “efecto Thomson” para realizar mediciones. Uno de los pioneros, *Edward E. Simmons*, trabajaba en California. Utilizando hilos de seda como urdidumbre y un fino hilo metálico como trama fabricó un tejido que pegó a un cilindro de acero creando así un dispositivo eléctrico para medir las fuerzas ejercidas sobre una muestra por un péndulo de impacto. *Arthur Claude Ruge*, trabajaba en la Facultad de Sismología en el Massachusetts Institute of Technology y quería determinar la tensión producida por las vibraciones de un terremoto simulado sobre un modelo de cisterna resistente a terremotos. Los equipos para la medición de la deformación disponibles en aquella época no se podían utilizar debido a las finas paredes del modelo. Ninguno de los numerosos dispositivos era apropiado. En un último intento Ruge tomó un fino hilo metálico, lo pegó en forma de meandro sobre un trozo de papel de seda fino y terminó las puntas con conexiones más gruesas. Para poder investigar las propiedades del prototipo lo pegó sobre una viga a flexión y comparó las medidas con un dispositivo tradicional de medición de deformación. Observó una buena correlación con una reacción lineal entre la deformación y los valores medidos a lo largo de todo el rango de medición, tanto para deformaciones positivas como para las negativas, incluyendo una buena estabilidad del cero. Así fue como se inventó la “Banda Extensométrica de resistencia eléctrica con rejilla encolada”. La configuración empleada en aquellos primeros ensayos continúa siendo prácticamente la misma en los dispositivos actuales.

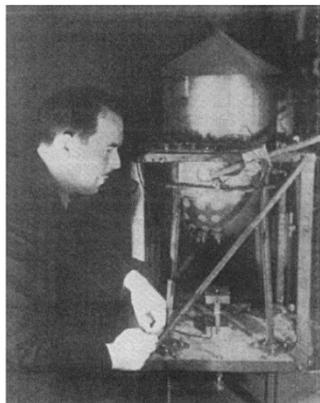


Figura 1.3. Arthur Claude Ruge, inventor de la banda extensométrica durante sus mediciones.

La idea decisiva de Ruge que le distinguiría de Simmons, fue que fijó el hilo de medida sobre un material de soporte creando un instrumento independiente

fácilmente manejable, que se podía pegar sobre cualquier superficie. Era muy fino y ligero, no requería ninguna fuerza de fijación y prácticamente no presentaba efectos retroactivos, permitiendo la medición en objetos muy delgados. Combinado con amplificadores electrónicos permitía mediciones tanto estáticas como dinámicas. Incluso los primeros prototipos ya se mostraron muy superiores a los demás instrumentos para la medición de la deformación.

Un segundo logro de Ruge fue desarrollar la banda extensométrica hasta que alcanzó su madurez de producción. Fue el hecho decisivo que inició la supremacía de su invención. Queda, por tanto, justificado bautizar a Ruge como el padre de la banda Extensométrica. No sólo tuvo la idea, sino que también vio las innumerables posibilidades de su aplicación y la determinación necesaria para convertirla en un instrumento fiable para el análisis de tensiones. Sus trabajos científicos lo certifican. Al principio se creía que era necesario cubrir la delicada estructura con un marco rígido y que los finos hilos de tan sólo los $25\mu\text{m}$ de grosor debían ser protegidos con una cobertura de fieltro. La **figura 1.4** muestra uno de los primeros ejemplares de banda extensométrica producidos en serie.

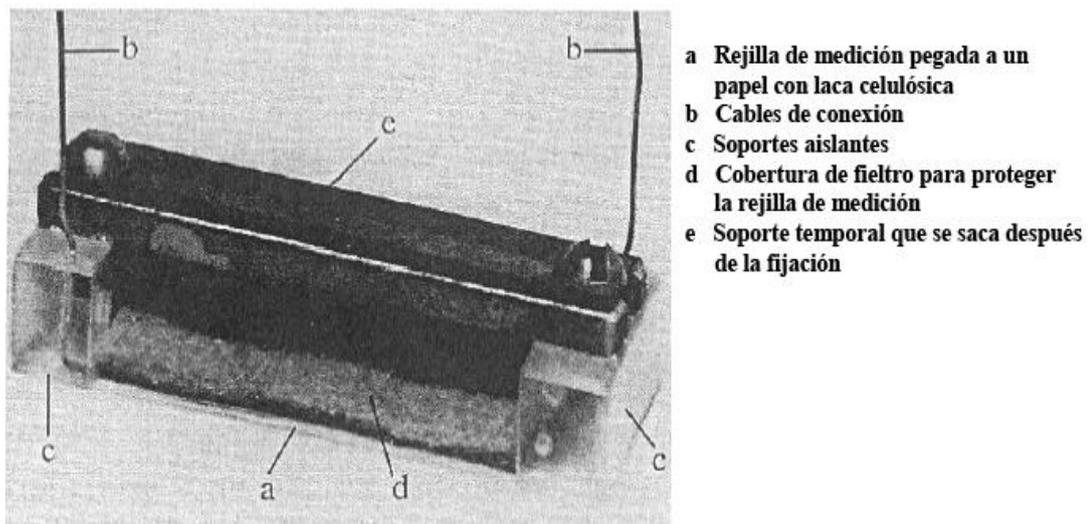


Figura 1.4. El primer diseño de banda extensométrica apto para la producción.

La demanda, especialmente por parte de la industria aeronáutica americana era tan elevada que este tipo de configuración tuvo que ser descartado. Se menciona que hubo un volumen de ventas de 50.000 bandas en dos meses de 1941. Finalmente la experiencia mostró que la complicada estructura de protección era innecesaria y se introdujo el modelo simplificado mostrado en la **figura 1.5**, que se mantuvo

durante varias décadas con tan sólo pequeños cambios. Numerosas patentes demuestran los constantes esfuerzos de Ruge por mejorar las propiedades de medición de su instrumento.

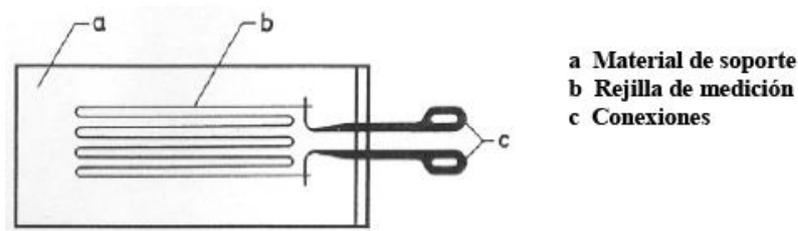


Figura 1.5. Diseño característico de una banda extensométrica con rejilla de medición de hilo.

Posteriormente se probaron varias modificaciones para racionalizar la producción. Particularmente hay que destacar la técnica del “circuito impreso” de *Paul Eisler*, que en su forma refinada llevó al desarrollo de la “banda extensométrica impresa” a partir de 1952. Ver **figura 1.6**.

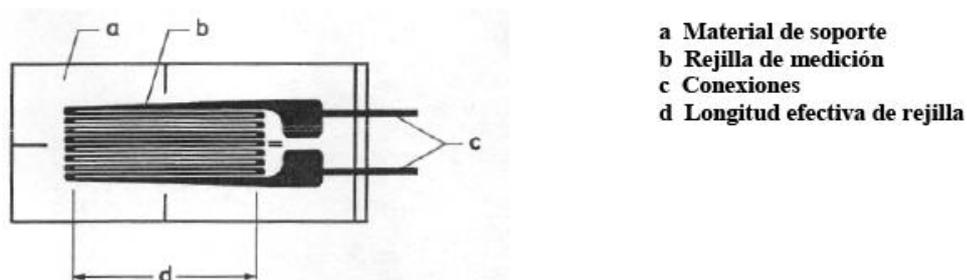


Figura 1.6. Diseño característico de una banda extensométrica con una lámina de metal impreso como rejilla de medición.

Este método amplía considerablemente las posibilidades de diseño a todas las formas representables en un plano que son realizables sin esfuerzos adicionales. Formas en espiral son tan fácilmente realizables como las redes que se utilizan para los transductores de fuerza, presión, pares de torsión u otras variables mecánicas.

Las bandas extensométricas se fabrican en una multitud de diseños distintos, proporcionando un método adaptable a distintas tareas de medición, incluso bajo las condiciones más difíciles. Las áreas fundamentales de aplicación de las bandas extensométricas son:

- El análisis experimental de tensiones, incluyendo las técnicas de medición de modelos y la biomecánica.

- La producción de transductores.

Mientras que la capacidad de adaptación de las bandas extensométricas contribuyó a su difusión en el área del análisis experimental de tensiones, fue su alta precisión de medición la que las hizo atractivas para la fabricación de transductores. Tanto las de circuito impreso como las de hilo enrollado son conocidas como bandas extensométricas metálicas debido a sus rejillas de medición de aleación metálica [2].

1.2. Definición de banda o galga extensométrica.

Una galga extensométrica o “strain gage” (en inglés) es un dispositivo transductor universal que se utiliza para la medición electrónica de diversas magnitudes mecánicas, como pueden ser: 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 se lo pone en términos matemáticos, strain (ϵ) se define como la fracción de cambio en longitud. El parámetro strain puede ser positivo (tensión) o negativo (compresión); este valor es adimensional [4]. En la práctica, la magnitud de medida de una galga es muy pequeña por lo que usualmente se expresa como microstrain o microdeformaciones ($1\mu\epsilon = 10^{-6}$ m/m, es decir una deformación de una micra respecto a un metro) [5].

Las galgas se utilizan ampliamente en diversas aplicaciones a nivel industrial, de investigación en ingeniería y en todos los campos donde se requieran mediciones precisas de fuerza. Esas mediciones pueden ser de tres tipos:

- **Estáticas:** las referidas a soportes y estructuras resistentes sometidas a cargas fijas.
- **Mixtas:** cuando se realizan sobre soportes y estructuras sometidas a la acción de cargas de variación rápida.
- **Dinámicas:** realizadas sobre acciones de variación rápida: fenómenos de vibración, impacto, etc.

1.3. Tipos de galgas extensométricas.

Galgas metálicas:

Las galgas metálicas se constituyen por una base muy delgada y fina, a la cual se le adhiere un hilo muy fino metálico, puede ser bobinado o plegable, al final los 2

terminales en los que acaba el hilo se unen a los transductores. Estas galgas tienen como ventaja un bajo coeficiente de temperatura, ya que se compensa la disminución de la movilidad de los electrones al aumentar la temperatura con el aumento de su concentración. En las galgas metálicas la corriente máxima es de unos 25 mA si el soporte es buen conductor de calor, y 5mA en el caso contrario; de todas formas en las galgas metálicas hay una gran limitación en la corriente. Las principales características de las galgas metálicas en condiciones habituales establecen que su tamaño tiene una variación entre 0.4mm y 150mm, tienen una resistencia variable entre 120 Ω y 5000 Ω y su tolerancia a la resistencia está en el rango de 0.1% y 0.2%. La resistencia eléctrica de la galga metálica está dada por la relación entre la resistividad y la longitud respecto al área transversal [6].

Estas pueden ser de:

- **Hilo metálico:** Están adheridas a una base con medidas constantes, estas presentan errores cuando existen estados tensionales y son las más sencillas. Están compuestas por una película de protección, un soporte, un hilo de medida y los terminales de conexión.
- **Película metálica:** Esta clase de galgas tiene una característica de fabricación similar a los circuitos impresos que tienen bases flexibles. Se desarrollan por la creación de placas utilizando fotografías, llamado el método de fotograbado.
- **Metal depositado:** Son aplicadas directamente sobre la superficie mediante dos métodos la evaporización o el bombardeo químico.

Galgas semiconductoras:

En las galgas semiconductoras hay un elemento semiconductor en vez del hilo metálico, su gran diferencia respecto a las demás galgas, es su tamaño, ya que su tamaño es más reducido. La potencia máxima disipable en galgas semiconductoras es de unos 250 mW. Las galgas semiconductoras son capaces de soportar una alta resistencia su fatiga de vida es más larga y tiene menor histéresis, que es la capacidad de que el material conserve sus propiedades bajo diferentes estímulos. Existen ciertos aspectos característicos bajo condiciones normales de las galgas semiconductoras, su tamaño varía entre los 1 mm y 5 mm, su resistencia está

aproximadamente entre un rango de 1000 Ω a 5000 Ω y su tolerancia a la resistencia está entre 1% y 2% [6].

1.4. Principio de funcionamiento de las galgas extensométricas.

Su principio de funcionamiento se basa en el efecto piezorresistivo de metales y semiconductores, según el cual, su resistividad varía en función de la deformación a la que están sometidos, el material de que está hecho y el diseño adoptado.

Si se considera un hilo metálico de longitud l , sección transversal A y resistividad ρ , su resistencia eléctrica R es:

$$R = \rho \left(\frac{l}{A} \right) \quad (1)$$

Si se le somete a un esfuerzo en dirección longitudinal, cada una de las tres magnitudes que intervienen en el valor de R cambia, por tanto el cambio de R se puede expresar como:

$$\Delta R = \frac{A(\rho \Delta l + l \Delta \rho) - \rho l \Delta A}{A^2} \quad (2)$$

El cambio de longitud que resulta de aplicar una fuerza F a una pieza unidimensional (siempre y cuando no se supere su límite elástico, Figura 1), está dado por la ley de Hooke.

$$\sigma = \frac{F}{A} = E \varepsilon = E \frac{\Delta l}{l} \quad (3)$$

Donde E es el módulo de elasticidad del material, denominado módulo de Young, σ es el esfuerzo uniaxial y ε es la deformación unitaria.

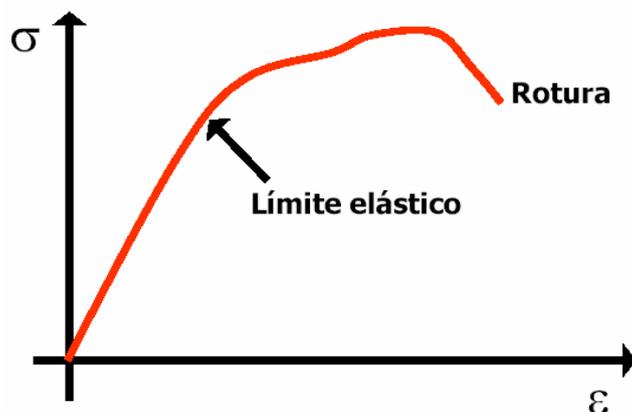


Figura 1.7. Relación entre esfuerzos y deformaciones.

Cuando el hilo se estira en dirección axial, el área de la sección transversal disminuye, ya que la masa total debe conservarse. La razón de la deformación lateral a la deformación axial también es una propiedad del material, esta propiedad se llama razón de Poisson y se define como:

$$\mu = -\frac{\Delta D / D}{\Delta l / l} \quad (4)$$

Donde **D** es el diámetro del hilo y **μ** es denominado coeficiente de Poisson. Su valor está entre 0 y 0.5, en términos de la razón de Poisson tendremos:

$$\frac{\Delta R}{R} = \frac{\Delta l}{l} [1 + 2\mu] + \frac{\Delta \rho}{\rho} \quad (5)$$

Los cambios en la resistencia se originan por la modificación de la geometría en la longitud o el área y el cambio en la resistividad. La dependencia de la resistividad en deformación mecánica se expresa en términos del coeficiente de piezoresistencia (π_1) definido por la siguiente expresión:

$$\pi_1 = \frac{1}{E} \frac{\Delta \rho / \rho}{\Delta l / l} \quad (6)$$

Por lo tanto el cambio en la resistencia es:

$$\frac{\Delta R / R}{\Delta l / l} = 1 + 2\mu + \pi_1 E \quad (7)$$

Si un alambre recto se estira elásticamente, la longitud aumentará y la sección transversal se reducirá por el efecto de Poisson. Entonces se observa que ambos efectos son aditivos y causan que la resistencia aumente, permaneciendo la resistividad constante. Por lo tanto sirve para expresar el cambio de resistencia de un conductor en relación con el cambio de longitud que lo causa, el término “sensibilidad de elongación” que se puede expresar como:

$$S_A = \frac{\Delta R / R}{\varepsilon} \quad (8)$$

La sensibilidad de elongación de un conductor metálico depende en gran parte de las características de la aleación en particular: trabajo en frío, nivel de impurezas en la aleación y el rango de deformaciones sobre el cual se mide [7].

Tabla1: Sensibilidad a la deformación S_A de aleaciones comunes utilizadas en galgas extensométricas.

Material	Composición %	S_A
Advance o Constantan	45 Ni, 55 Cu	2.1
Nichrome	80 Ni, 20Cr	2.2
Isoelastic	36 Ni, 8 Cr, 0.5 Mo, 55.5 Fe	3.6
Karma	74 Ni, 20 Cr, 3 Al, 3 Fe	2.0
Armour D	70 Fe, 20 Cr, 10 Al	2.0
Alloy 479	92 Pt, 8 W	4.1

Dado que la relación de Poisson es aproximadamente 0.3 para la mayoría de las aleaciones usadas como conductores para galgas, la sensibilidad de elongación será de 1.6 cuando sólo se considera el aspecto de cambios dimensionales del conductor. Esto significa que un incremento elástico de 0.1% de longitud producirá un incremento de 0.16% de resistencia. La definición de Sensibilidad de elongación en una galga extensométrica se denomina *factor de galga* (S_g), y es proporcionado por el fabricante [8].

Tabla 2: Factor de S_g , Sensibilidad axial S_a , Sensibilidad transversal S_t , Factor de sensibilidad transversal K_t para diferentes tipos de galgas.

Tipo de galga	S_g	S_a	S_t	K_t
EA-06-015CK-120	2.13	2.14	0.0385	1.8
EA-06-030TU-120	2.02	2.03	0.0244	1.2
WK-06-030TU-350	1.98	1.98	0.0040	0.2
WK-06-062DY-350	1.96	1.96	0.0098	-0.5
EA-06-500AF-120	2.09	2.09	0.0	0.0

1.5. Circuito de medida de las galgas.

La medición de galgas extensométricas es un caso especial de medición de la variación que tienen en su resistencia. Se requiere utilizar un puente resistivo para poder medir los pequeños cambios en su resistencia; para ello se utiliza el puente de Wheatstone, inventado por el físico inglés Charles Wheatstone en 1843 [9].

1.6. Selección y compromiso de selección de la galga extensométrica.

Lo primero que debemos hacer, dependiendo del tipo de trabajo o tarea específica que se vaya a realizar, es seleccionar el tipo de galga para obtener unos resultados apropiados, esto aparentemente puede resultar bastante simple, pero no se debe dejar a un lado que de una selección racional, analizando las características y los parámetros específicos de las Galgas Extensométricas, dependen ciertos elementos como pueden ser:

- La optimización del rendimiento de la galga extensométrica en condiciones específicas, en cuanto a lo que tiene que ver con la operación y el medio ambiente en el que se realiza dicho ensayo.
- La obtención de unos resultados confiables y precisos de los esfuerzos.
- La facilidad de instalación de la galga.
- Minimizar al máximo los costos de instalación de las galgas extensométricas.

Muchos otros factores como los que tienen que ver con la duración en el tiempo, el rango de esfuerzos en el que se esté trabajando y las temperaturas de operación, deben ser también considerados, para que de esta manera se pueda elegir la mejor combinación de galga extensométrica-adhesivo correspondiente [10].

Debemos tener en cuenta que el proceso de selección de la galga extensométrica, generalmente trae consigo una serie de compromisos. Esto se debe, a que cuando se selecciona una galga con determinados parámetros con el objetivo de satisfacer algún requerimiento en particular, se pueden estar descuidando otros parámetros fundamentales que pueden influir negativamente en dicha selección. Por ejemplo, cuando se va a trabajar en espacios sumamente reducidos, donde la instalación y utilización de la galga se dificulta y el gradiente de esfuerzos es elevado, la utilización de una de las galgas más cortas puede ser la opción ideal para este tipo de trabajo, sin embargo se debe tener en cuenta que las galgas más pequeñas (de 3 mm), están generalmente caracterizadas por tener una elongación máxima pequeña y la vida útil de la galga se ve notablemente reducida cuando esta se somete a condiciones de fatiga. Por estas razones es necesario llegar a un compromiso que ayude a satisfacer cualquier conjunto de circunstancias que se

puedan presentar y juzgar este compromiso en la validez y la precisión de los datos obtenidos [10].

1.7. Limitaciones de las galgas extensométricas [11].

- El esfuerzo aplicado no debe llevar a la galga fuera del margen elástico o también llamado esfuerzo de fluencia.
- La deformación de la galga.
- El incremento en la galga debe ser en la misma dirección al del soporte para evitar tensiones opuestas en lo que alineación de la galga se refiere, ya que mide en una sola dirección.
- La galga solo proporciona los datos para las direcciones a las que la galga ha sido diseñada. Si se quiere medir en direcciones perpendiculares se puede poner otra galga igual a 90° de la inicial, por lo tanto, una sola galga puede medir solamente una dirección.

1.8. Ventajas de las galgas extensométricas [11].

- Pequeño tamaño
- Pueden ser alimentadas con corriente continua o corriente alterna.
- Tienen una excelente respuesta en frecuencia.
- Son simples y adecuadas en medidas estáticas y dinámicas.
- Compensación de temperatura relativamente fácil, al instalar dos galgas idénticas en brazos adyacentes elimina los efectos de temperatura en la galga medidora ya que al tener dos galgas, si se mide la diferencia de resistencia entre ambas, se descarta el efecto de la temperatura.

1.9. Desventajas de las galgas extensométricas [12].

- La señal de salida es débil.
- Pequeño movimiento de la galga.
- Son afectadas por muchos factores de variación en condiciones ambientales.
- La galga es ultra sensible a las vibraciones.
- Con el tiempo la galga puede perder adhesión al espécimen de prueba.
- Para umbrales pequeños la técnica de construcción es cara.
- Se ven afectadas por el cambio de temperatura.

- Son afectadas por la presencia de ruido térmico que establece un mínimo para la variación de resistencia detectable.
- Son poco estables.

1.10. Aplicaciones de las galgas extensométricas.

Las aplicaciones de las galgas extensométricas resistivas son casi innumerables, pero su aplicación directa se puede concretar a aquellas situaciones que requieren la medida de esfuerzos y deformaciones en estructuras tales como aviones, vagones de tren, puentes, grúas, hormigón armado, automóviles, edificios, etc.

1.11. Fundamentos teóricos de las galgas tipo roseta.

1.11.1. Roseta.

Una roseta de deformación es un arreglo de tres galgas extensométricas utilizado para medir el estado de deformaciones de un material en el plano, lo cual implica medir la deformación normal en X (E_x), la deformación normal en Y (E_y) y la deformación cortante en el plano (γ_{xy}). Debido a que una galga sólo puede medir la deformación normal, a veces resulta más conveniente utilizar una roseta de deformación.

Para nombrar a cada una de las galgas se usan las primeras letras del abecedario, comenzando por la roseta horizontal y siguiendo el sentido opuesto de las manecillas del reloj. Los valores de deformación que se obtiene en la roseta son E_a , E_b , y E_c por lo que se tiene que resolver las siguientes ecuaciones para obtener los valores de E_x , E_y y γ_{xy} .

$$\begin{aligned} \epsilon_a &= \epsilon_x \cdot \cos^2\theta_a + \epsilon_y \cdot \sin^2\theta_a + \gamma_{xy} \cdot \sin\theta_a \cdot \cos\theta_a \\ \epsilon_b &= \epsilon_x \cdot \cos^2\theta_b + \epsilon_y \cdot \sin^2\theta_b + \gamma_{xy} \cdot \sin\theta_b \cdot \cos\theta_b \\ \epsilon_c &= \epsilon_x \cdot \cos^2\theta_c + \epsilon_y \cdot \sin^2\theta_c + \gamma_{xy} \cdot \sin\theta_c \cdot \cos\theta_c \end{aligned} \quad (9) [13].$$

Aunque pueden crearse infinidad de combinaciones para el arreglo de galgas, existen dos que son las más utilizadas: la roseta rectangular y la roseta delta.

1.12. Tipos de Roseta.

1.12.1. Roseta rectangular.

-Una roseta se dice que es rectangular cuando sus galgas están arregladas con una diferencia de 45° entre sí, por lo que una roseta se encontrará en posición horizontal, una en posición vertical y otra a un ángulo de 45° .

Con este arreglo de galgas, las deformaciones son las siguientes [13]:

$$\begin{aligned}\epsilon_x &= \epsilon_a \\ \epsilon_y &= \epsilon_c \\ \gamma_{xy} &= 2\epsilon_b - \epsilon_a + \epsilon_b\end{aligned}\tag{10}$$

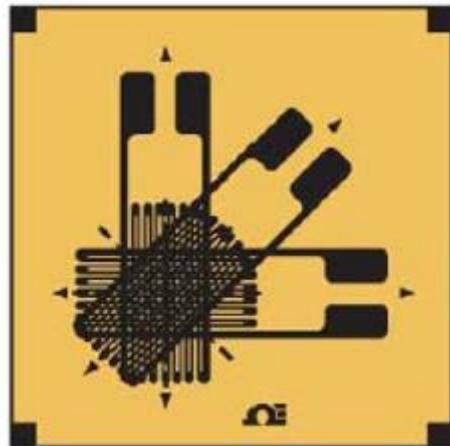


Figura 1.8. Roseta rectangular [14].

1.12.2. Roseta delta.

- Se dice roseta delta a aquella que tiene sus galgas posicionadas con una diferencia de 60° y, por último, una a 120° .

Con este arreglo de roseta las deformaciones en los ejes son los siguientes:

$$\begin{aligned}\epsilon_x &= \epsilon_a \\ \epsilon_y &= \frac{1}{3}(2\epsilon_b + 2\epsilon_c - \epsilon_a) \\ \gamma_{xy} &= \frac{2}{\sqrt{3}}(\epsilon_b - \epsilon_c)\end{aligned}\quad (11) [13]$$

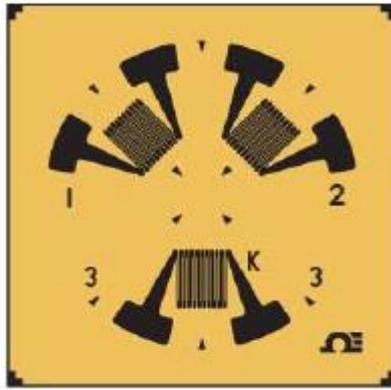


Figura 1.9. Roseta delta [14].

1.13. Análisis de Rosetas.

Para especificar completamente el estado de esfuerzos sobre cualquier punto en la superficie libre de un sólido (no cargado), es necesario conocer tres cantidades independientes. Dichas cantidades son las magnitudes de dos esfuerzos principales, σ_1 ; σ_2 y sus direcciones, Φ ó $(\Phi + 45^\circ)$ con respecto a alguna referencia.

Para materiales isotrópicos elásticos, estos valores pueden calcularse a partir de las deformaciones unitarias medidas sobre la superficie en el punto en cuestión*, en general, es necesario efectuar tres mediciones independientes de la deformación unitaria a fin de determinar las tres cantidades independientes. Sin embargo, existen algunas situaciones especiales en las cuales con una o dos mediciones de la deformación unitaria, será suficiente para especificar completamente el estado de esfuerzo.

*Aunque se haga referencia a la condición de esfuerzos en un punto, la medición de la deformación principal será el valor promedio que se obtenga en una distancia pequeña. Por lo tanto, desde un punto de vista práctico, los resultados que se obtengan al emplear una roseta, corresponderán a la condición promedio sobre un

área pequeña. Esto no será muy objeccionable si la longitud sobre la cual se mide la deformación unitaria es lo suficientemente pequeña como para que no se tengan cambios de un extremo a otro. Por lo tanto, la longitud de la galga dependerá del gradiente de la deformación unitaria, pudiendo tener valores muy pequeños (1/32" ó 1/19") hasta 6" u 8" ó aún más.

1.14. Geometría de la roseta.

Teóricamente, no tiene importancia las direcciones de las mediciones de la deformación unitaria, pero debido a consideraciones prácticas, se prefieren ciertas orientaciones para resolver más fácilmente las ecuaciones, la cual permite más simplicidad en los cálculos para la obtención de los esfuerzos en términos de las deformaciones unitarias.

Actualmente, se han aceptado cuatro arreglos de la posición de los ejes de las galgas de las rosetas. Básicamente son dos arreglos, el rectangular y el delta, pero cada uno de ellos tiene una modificación que involucra una cuarta observación redundante de la deformación unitaria.

1.15. Ejemplo de ubicación de la roseta.

Cuando existe torsión pura, la dirección de las deformaciones sufridas por la barra, con respecto al eje de la misma son de 45° y -45° como se indica en la figura. Mediante la roseta se podrá medir estas deformaciones sin tomar en cuenta la deformación en el eje de la barra que será cero. En la figura 1.10 se presenta la roseta en la probeta.

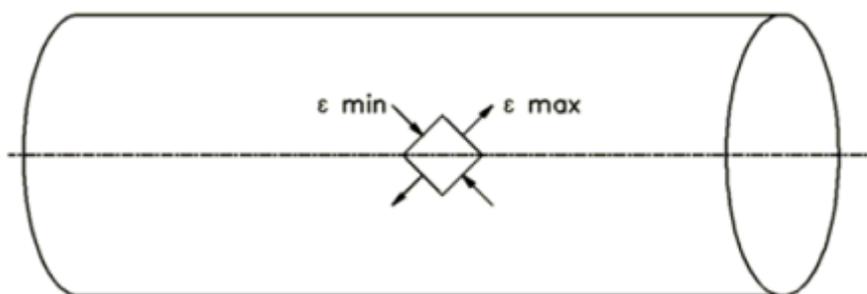


Figura 1.10. Deformaciones en barras sometidas a torsión pura.

Conclusiones parciales

- ❖ Una galga extensométrica o “strain gage” (en inglés) es un dispositivo transductor universal que se utiliza para la medición electrónica de diversas magnitudes mecánicas, existiendo 2 tipos: las galgas metálicas y las semiconductoras. La galga extensométrica funciona basada en el efecto piezorresistivo de metales y semiconductores.
- ❖ Las galgas extensométricas son de pequeño tamaño y pueden ser alimentadas por CC y CA. Son ultra sensible a las vibraciones y se ven afectadas por el cambio de temperatura. Son casi innumerables sus aplicaciones, pues pueden medir esfuerzos y deformaciones a aviones, vagones de trenes, etc.
- ❖ Una roseta de deformaciones es un arreglo de tres galgas extensométricas utilizado para medir el estado de tensiones de un material en el plano. Existiendo dos tipos que se destacan, la roseta rectangular y la delta.

Capítulo II: Montaje de práctica de laboratorio de medición de tensiones con rosetas de deformación.

La roseta de deformaciones es, por definición, un arreglo de dos o más strain gage utilizadas para medir deformación normal a lo largo de diferentes direcciones en una superficie plana. Son muy útiles en el análisis experimental de tensiones, fundamentalmente en los casos de los estados de tensiones biaxiales en los que se desconoce la magnitud y la dirección de las tensiones principales [10]. Con ese fin se fabrican varios tipos de rosetas, en este trabajo se utilizan rosetas rectangulares.

2.1. Selección de la resistencia de la galga.

Las bandas extensométricas se fabrican con distintas resistencias. Los valores de las mismas tienen un origen histórico pero han demostrado ser útiles y por eso continúan en uso [3]. El valor más común es el de 120 Ω . La mayor selección de bandas se encuentra para este grupo de resistencias. Se emplean principalmente para el análisis de tensiones, los sistemas de monitorización, etc. Las bandas de 350 Ω , 700 Ω y 1000 Ω también se utilizan ampliamente para la fabricación de transductores. Para este trabajo se utilizó una roseta con una resistencia de 120 Ω .

2.2. Selección del voltaje de entrada.

Si se toma una banda con una rejilla de 6mm y una resistencia de 120 Ω y se conecta en un circuito de puente simétrico alimentado por una tensión de 5 V, la corriente que circula por la banda es 20,8 mA. A primera vista no parece mucho, pero si se considera en relación con la sección transversal extremadamente pequeña de los elementos de la rejilla se obtiene un resultado para la densidad de corriente de 46 A/mm², un valor muy alto incluso para la ingeniería eléctrica de potencia [3]. Con pequeñas secciones transversales del conductor solamente es posible disipar la energía calorífica hacia el ambiente si la relación entre el área de la sección transversal y el área de la superficie es favorable. Los parámetros de mayor influencia son:

- El nivel de la tensión de alimentación del puente.
- La resistencia eléctrica de la rejilla de medición.

- El tamaño y la geometría de la rejilla.
- Temperatura del ambiente.
- La conductividad térmica del material del componente.
- La capacidad calorífica y las características de radiación y de enfriamiento del componente.

Si la potencia eléctrica aplicada sobre la rejilla es demasiado grande se produce el sobrecalentamiento de la rejilla, del soporte o de la capa adhesiva que produce histéresis, fluencia, inestabilidad del punto cero y un empeoramiento de la compensación de la temperatura. Por esas razones se toma como voltaje de alimentación 1 V, que es el menor valor que permite el equipo utilizado.

2.3. Preparación de la práctica.

Primeramente se realiza el pegado de la galga como se muestra en la Fig.2.1 siguiendo las instrucciones mostradas en [15]. Como se aprecia la roseta utilizada es rectangular, es decir dos galgas colocadas a 90° y otra entre ellas a 45°. Con posterioridad la roseta se cubre con parafina para su protección.



Fig.2.1. Montaje de la roseta.

Después de pegada la roseta se realiza la soldadura de los elementos que conformarán el circuito. Cada galga de la roseta se conectará de forma independiente como un cuarto de puente de Wheatstone. Es decir que para medir se tendrán tres puentes (Fig.2.2), por tal motivo el dispositivo de medición debe tener como mínimo tres canales de medición, condición que cumple el puente YE3817 [15]. Es importante destacar que para la construcción del puente se deben utilizar tres resistencias del mismo valor que la galga utilizada (en este caso que es

un cuarto de puente). En este montaje se utilizaron tres galgas similares a la encargada de la medición para el balanceo del puente.



Fig 2.2. Montaje de los tres puentes necesarios para la medición con la roseta.

2.4. Unidades utilizadas en la medición de la deformación.

La variación de longitud absoluta (Δl) es la diferencia entre la longitud inicial (l_0) y la longitud final (l).

$$\Delta l = l - l_0 \quad (2.1)$$

Sin embargo la longitud de referencia utilizada tiene gran influencia en el resultado de la longitud absoluta como se muestra en la Fig. 2.3.

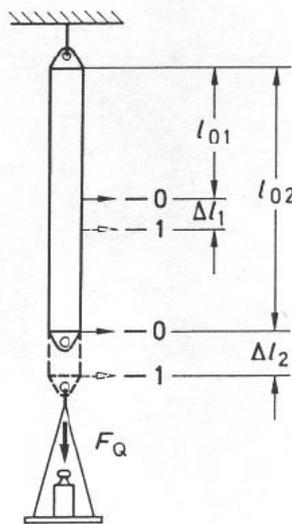


Fig.2.3. Experimento de “Elongación absoluta”. (Tomado de [3])

En un elemento en forma de barra, libremente suspendido, se marcan la longitud l_{01} y la longitud doble l_{02} como de base. Luego se aplica la fuerza F_Q sobre la tira. La medición muestra que la elongación Δl_2 es el doble que la elongación Δl_1 . Por tanto la variación de longitud es una función de la longitud base:

$$\Delta l = f(l_o) \quad (2.2)$$

Sin embargo, si se expresa la variación de la longitud en relación a la longitud base se obtiene el mismo valor para ambos casos:

$$\frac{\Delta l_2}{l_{02}} = \frac{2\Delta l_1}{2l_{01}} = \frac{\Delta l_1}{l_1} \quad (2.3)$$

Por este motivo se utiliza la variación de longitud relativa como variable de medición en la Resistencia de Materiales y para la extensometría. Se utiliza el símbolo ε para describir la elongación relativa (a este término se le llama también *deformación unitaria longitudinal* en algunos textos).

$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l_o} \quad (2.4)$$

La “deformación” es un término técnico recogido en la norma ISO 31. Se utiliza tanto para describir una elongación como para describir un acortamiento; en el

primer caso se trata de una “deformación positiva” y en el segundo de una “deformación negativa”.

Las longitudes se miden en unidades conocidas, según el Sistema Internacional de Unidades esta debe ser en metros (m). La deformación ε se define como el cociente entre una variación de longitud Δl y una longitud de referencia l_0 . En consecuencia la unidad de deformación es (m/m):

$$\varepsilon = \left\{ \frac{\Delta l}{l_0} \right\} \left[\frac{m}{m} \right] \quad (2.5)$$

Lo que indica que es en realidad adimensional. En el caso de la extensometría estas variaciones de longitud son muy pequeñas, por tal motivo se emplean submúltiplos normalizados del metro, siendo la más común el μm que es igual a 10^{-6} m. Ejemplo:

$$\varepsilon = 180 \cdot 10^{-6} \frac{m}{m} = 180 \frac{\mu\text{m}}{m}$$

Una relación adimensional se caracteriza por tener la misma unidad en el numerador y en el denominador de la fracción, por ejemplo m/m. Esta fracción se podría simplificar matemáticamente, obteniendo un valor sin dimensión, pero con ello se perdería la información física acerca de su origen.

2.5. Determinación de la ganancia del equipo.

Para la realización del ensayo se utilizará corriente directa y se aplicará 1 volt como corriente de entrada.

Para la determinación de la ganancia que se debe utilizar se realizaros varias mediciones cambiando este parámetro como se muestra en las tablas siguientes.

Tabla 2.1. Variaciones de voltaje con una ganancia de 100

No	Carga P (kgf)	Voltaje de salida 1 V_s (V)	Voltaje de salida 2 V_s (V)	Voltaje de salida 3 V_s (V)	Incremento de Voltaje de salida 1 ΔV_s	Incremento de Voltaje de salida 2 ΔV_s	Incremento de Voltaje de salida 3 ΔV_s
1		-0.001	-0.005	-0.002			
					0.001	0.004	0.001
2		-0.002	-0.009	-0.003	0.002	0.004	0.002
3		-0.004	-0.013	-0.005	0.001	0.004	0.001
4		-0.005	-0.017	-0.006	0.002	0.004	0.002
5		-0.007	-0.021	-0.008	0.001	0.004	0.001
6		-0.008	-0.025	-0.009			
					$\sum \Delta V_s 1 = 0.007$	$\sum \Delta V_s 2 = 0.020$	$\sum \Delta V_s 3 = 0.007$
					$\Delta V_s 1 \text{ prom} = 0.0014$	$\Delta V_s 2 \text{ prom} = 0.004$	$\Delta V_s 3 \text{ prom} = 0.0014$

Para determinar los incrementos de voltaje se debe calcular la diferencia entre los resultados de la medición dos y la uno para el primer caso, en el segundo será la diferencia entre la medición tres y la dos, y así sucesivamente hasta completar los seis incrementos que se producirán al hacer siete mediciones.

Con posterioridad se determinan las deformaciones unitarias en cada una de las direcciones utilizando la expresión:

$$\varepsilon_p = \frac{4 \cdot \Delta V_s \text{ prom}}{V_e \cdot K \cdot K_f} \text{ (cuarto de puente)}$$

Dónde:

Ve - voltaje de entrada

K - factor del extensómetro (lo da el fabricante)

ΔV_s prom – Valor promedio del Voltaje de salida

Kf - Ganancia

Para Kf=100 y K=2.20 se determinan las deformaciones unitarias en cada una de las direcciones:

$$\varepsilon_1 = \frac{4 \cdot 0.0014}{1 \cdot (2.20) \cdot (100)}$$

$$\varepsilon_2 = \frac{4 \cdot 0.004}{1 \cdot (2.20) \cdot (100)}$$

$$\varepsilon_1 = 2.54 \cdot 10^{-5}$$

$$\varepsilon_2 = 7.27 \cdot 10^{-5}$$

$$\varepsilon_3 = \frac{4 \cdot 0.0014}{1 \cdot (2.20) \cdot (100)}$$

$$\varepsilon_3 = 2.54 \cdot 10^{-5}$$

$$\varepsilon_1 = \frac{\varepsilon_1 + \varepsilon_3}{2} + \frac{1}{2} \sqrt{(\varepsilon_1 - \varepsilon_3)^2 + (2\varepsilon_2 - \varepsilon_1 - \varepsilon_3)^2}$$

$$\varepsilon_2 = \frac{\varepsilon_1 + \varepsilon_3}{2} - \frac{1}{2} \sqrt{(\varepsilon_1 - \varepsilon_3)^2 + (2\varepsilon_2 - \varepsilon_1 - \varepsilon_3)^2}$$

$$\varepsilon_1 = \frac{(2.54 + 2.54) \cdot 10^{-5}}{2} + \frac{1}{2} \sqrt{[(2.54 - 2.54) \cdot 10^{-5}]^2 + [2 \cdot (7.27 \cdot 10^{-5}) - 2.54 \cdot 10^{-5} - 2.54 \cdot 10^{-5}]^2}$$

$$\varepsilon_1 = 7.27 \cdot 10^{-5}$$

$$\varepsilon_2 = \frac{(2.54 + 2.54) * 10^{-5}}{2} - \frac{1}{2} \sqrt{[(2.54 - 2.54) * 10^{-5}]^2 + [2 * (7.27 * 10^{-5}) - 2.54 * 10^{-5} - 2.54 * 10^{-5}]^2}$$

$$\varepsilon_2 = -2.19 * 10^{-5}$$

Se determinan las direcciones principales:

$$\operatorname{tg} 2\theta = \frac{2\varepsilon_2 - \varepsilon_1 - \varepsilon_3}{\varepsilon_1 - \varepsilon_3}$$

$$\tan 2\theta = \frac{2 * (7.27 * 10^{-5}) - 2.54 * 10^{-5} - 2.54 * 10^{-5}}{2.54 * 10^{-5} - 2.54 * 10^{-5}}$$

$$\theta = 0^\circ$$

Las tensiones principales se obtendrán con las expresiones:

$$E = 2 * 10^5 \text{ Mpa} \quad \mu = 0.3$$

$$\sigma_1 = E \left[\frac{\varepsilon_1 + \varepsilon_3}{2(1 - \mu)} + \frac{1}{2(1 + \mu)} \sqrt{(\varepsilon_1 - \varepsilon_3)^2 + (2\varepsilon_2 - \varepsilon_1 - \varepsilon_3)^2} \right]$$

$$\sigma_2 = E \left[\frac{\varepsilon_1 + \varepsilon_3}{2(1 - \mu)} - \frac{1}{2(1 + \mu)} \sqrt{(\varepsilon_1 - \varepsilon_3)^2 + (2\varepsilon_2 - \varepsilon_1 - \varepsilon_3)^2} \right]$$

$$\sigma_1 = 2 * 10^5 \left[\frac{(2.54 + 2.54) * 10^{-5}}{2(1 - 0.3)} + \frac{1}{2(1 + 0.3)} \sqrt{[(2.54 - 2.54) * 10^{-5}]^2 - [2 * (7.27 * 10^{-5}) - 2.54 * 10^{-5} - 2.54 * 10^{-5}]^2} \right]$$

$$\sigma_1 = 14.51 \text{ Mpa}$$

$$\sigma_2 = 2 * 10^5 \left[\frac{(2.54 + 2.54) * 10^{-5}}{2(1 - 0.3)} - \frac{1}{2(1 + 0.3)} \sqrt{[(2.54 - 2.54) * 10^{-5}]^2 - [2 * (7.27 * 10^{-5}) - 2.54 * 10^{-5} - 2.54 * 10^{-5}]^2} \right]$$

$$\sigma_2 = -0.02 \text{ Mpa}$$

Se calcula a continuación el momento flector en la barra:

$$Mf = P * X$$

$$Mf = (3.86 * 10^{-3}) \cdot (30 \text{ cm})$$

$$Mf = 0.1158 \text{ kN} \cdot \text{cm}$$

Se calcula módulo de resistencia a la flexión:

$$W_x = \frac{b * h^3}{6}$$

$$W_x = \frac{3 \cdot (0.4)^2}{6}$$

$$W_x = 0.08 \text{ cm}^3$$

Se calcula la σ_T mediante la siguiente expresión:

$$\sigma_T = \frac{Mf}{W_x}$$

$$\sigma_T = \frac{0.1158 \text{ kN} \cdot \text{cm}}{0.08 \text{ cm}^3}$$

$$\sigma_T = 1.448 \text{ kN/cm}^2$$

$$\sigma_T = 14.48 \text{ Mpa}$$

Se calcula el % de error con los datos correspondientes:

$$\% \text{ Error} = \frac{\sigma_T - \sigma_P}{\sigma_T}$$

$$\% \text{ Error} = \frac{\sigma_T - \sigma_P}{\sigma_T} * 100$$

$$\% \text{ Error} = \frac{14.48 - 14.51}{14.48} * 100$$

$$\% \text{ Error} = -0.2\%$$

Tabla 2.2. Variaciones de voltaje con una ganancia de 200

No	Carga P (kgf)	Voltaje de salida 1 V_s (V)	Voltaje de salida 2 V_s (V)	Voltaje de salida 3 V_s (V)	Incremento de Voltaje de salida 1 ΔV_s	Incremento de Voltaje de salida 2 ΔV_s	Incremento de Voltaje de salida 3 ΔV_s
1		-0.003	-0.009	-0.002			
					0.004	0.008	0.003
2		-0.007	-0.017	-0.005	0.003	0.008	0.004
3		-0.010	-0.025	-0.009	0.003	0.008	0.003
4		-0.013	-0.033	-0.012	0.003	0.006	0.003
5		-0.016	-0.039	-0.015	0.003	0.008	0.002
6		-0.019	-0.047	-0.017			
					$\sum \Delta V_s 1 = 0.016$	$\sum \Delta V_s 2 = 0.038$	$\sum \Delta V_s 3 = 0.015$
					$\Delta V_s 1 \text{ prom} = 0.0032$	$\Delta V_s 2 \text{ prom} = 0.0076$	$\Delta V_s 3 \text{ prom} = 0.003$

Para determinar los incrementos de voltaje se debe calcular la diferencia entre los resultados de la medición dos y la uno para el primer caso, en el segundo será la diferencia entre la medición tres y la dos, y así sucesivamente hasta completar los seis incrementos que se producirán al hacer siete mediciones.

Con posterioridad se determinan las deformaciones unitarias en cada una de las direcciones utilizando la expresión:

$$\varepsilon_p = \frac{4 \cdot \Delta V_s \text{prom}}{V_e \cdot K \cdot K_f} \text{ (cuarto de puente)}$$

Dónde:

V_e - voltaje de entrada

K - factor del extensómetro (lo da el fabricante)

$\Delta V_s \text{prom}$ – Valor promedio del Voltaje de salida

K_f - Ganancia

Para $K_f=200$ y $K=2.20$ se determinan las deformaciones unitarias en cada una de las direcciones:

$$\varepsilon_1 = \frac{4 \cdot 0.0032}{1 \cdot (2.20) \cdot (200)}$$

$$\varepsilon_2 = \frac{4 \cdot 0.0076}{1 \cdot (2.20) \cdot (200)}$$

$$\varepsilon_1 = 2.9 * 10^{-5}$$

$$\varepsilon_2 = 6.9 * 10^{-5}$$

$$\varepsilon_3 = \frac{4 \cdot 0.0024}{1 \cdot (2.20) \cdot (200)}$$

$$\varepsilon_3 = 2.18 * 10^{-5}$$

$$\varepsilon_1 = \frac{\varepsilon_1 + \varepsilon_3}{2} + \frac{1}{2} \sqrt{(\varepsilon_1 - \varepsilon_3)^2 + (2\varepsilon_2 - \varepsilon_1 - \varepsilon_3)^2}$$

$$\varepsilon_2 = \frac{\varepsilon_1 + \varepsilon_3}{2} - \frac{1}{2} \sqrt{(\varepsilon_1 - \varepsilon_3)^2 + (2\varepsilon_2 - \varepsilon_1 - \varepsilon_3)^2}$$

$$\varepsilon_1 = \frac{(2.9 + 2.18) \cdot 10^{-5}}{2} + \frac{1}{2} \sqrt{[(2.9 - 2.18) \cdot 10^{-5}]^2 + [2 \cdot (6.9 \cdot 10^{-5}) - 2.9 \cdot 10^{-5} - 2.18 \cdot 10^{-5}]^2}$$

$$\varepsilon_1 = 6.9 \cdot 10^{-5}$$

$$\varepsilon_2 = \frac{(2.9 + 2.18) \cdot 10^{-5}}{2} - \frac{1}{2} \sqrt{[(2.9 - 2.18) \cdot 10^{-5}]^2 + [2 \cdot (6.9 \cdot 10^{-5}) - 2.9 \cdot 10^{-5} - 2.18 \cdot 10^{-5}]^2}$$

$$\varepsilon_2 = -1.83 \cdot 10^{-5}$$

Se determinan las direcciones principales:

$$\operatorname{tg} 2\theta = \frac{2\varepsilon_2 - \varepsilon_1 - \varepsilon_3}{\varepsilon_1 - \varepsilon_3}$$

$$\tan 2\theta = \frac{2 \cdot (6.9 \cdot 10^{-5}) - 2.9 \cdot 10^{-5} - 2.18 \cdot 10^{-5}}{2.9 \cdot 10^{-5} - 2.18 \cdot 10^{-5}}$$

$$\theta = 0.74^\circ$$

Las tensiones principales se obtendrán con las expresiones:

$$E = 2 \cdot 10^5 \text{ Mpa} \quad \mu = 0.3$$

$$\sigma_1 = E \left[\frac{\varepsilon_1 + \varepsilon_3}{2(1 - \mu)} + \frac{1}{2(1 + \mu)} \sqrt{(\varepsilon_1 - \varepsilon_3)^2 + (2\varepsilon_2 - \varepsilon_1 - \varepsilon_3)^2} \right]$$

$$\sigma_2 = E \left[\frac{\varepsilon_1 + \varepsilon_3}{2(1 - \mu)} - \frac{1}{2(1 + \mu)} \sqrt{(\varepsilon_1 - \varepsilon_3)^2 + (2\varepsilon_2 - \varepsilon_1 - \varepsilon_3)^2} \right]$$

$$\sigma_1 = 2 \cdot 10^5 \left[\frac{(2.9 + 2.18) \cdot 10^{-5}}{2(1 - 0.3)} + \frac{1}{2(1 + 0.3)} \sqrt{[(2.9 - 2.18) \cdot 10^{-5}]^2 + [2 \cdot (6.9 \cdot 10^{-5}) - 2.9 \cdot 10^{-5} - 2.18 \cdot 10^{-5}]^2} \right]$$

$$\sigma_1 = 14 \text{ Mpa}$$

$$\sigma_2 = 2 * 10^5 \left[\frac{(2.9 + 2.18) * 10^{-5}}{2(1 - 0.3)} - \frac{1}{2(1 + 0.3)} \sqrt{[(2.9 - 2.18) * 10^{-5}]^2 + [2 * (6.9 * 10^{-5}) - 2.9 * 10^{-5} - 2.18 * 10^{-5}]^2} \right]$$

$$\sigma_2 = 0.52 MPa$$

Se calcula a continuación el momento flector en la barra:

$$Mf = P * X$$

$$Mf = (3.86 * 10^{-3}) * (30 \text{ cm})$$

$$Mf = 0.1158 \text{ kN} \cdot \text{cm}$$

Se calcula módulo de resistencia a la flexión:

$$W_x = \frac{b * h^3}{6}$$

$$W_x = \frac{3 * (0.4)^2}{6}$$

$$W_x = 0.08 \text{ cm}^3$$

Se calcula la σ_T mediante la siguiente expresión:

$$\sigma_T = \frac{Mf}{W_x}$$

$$\sigma_T = \frac{0.1158 \text{ kN} \cdot \text{cm}}{0.08 \text{ cm}^3}$$

$$\sigma_T = 1.448 \text{ kN} / \text{cm}^2$$

$$\sigma_T = 14.48 MPa$$

Se calcula el % de error con los datos correspondientes:

$$\% \text{ Error} = \frac{\sigma_T - \sigma_P}{\sigma_T}$$

$$\% \text{ Error} = \frac{\sigma_T - \sigma_P}{\sigma_T} * 100$$

$$\% \text{ Error} = \frac{14.48 - 14.28}{14.48} * 100$$

$$\% \text{ Error} = 1.4\%$$

Tabla 2.3. Variaciones de voltaje con una ganancia de 500

No	Carga P (kgf)	Voltaje de salida 1 V _s (V)	Voltaje de salida 2 V _s (V)	Voltaje de salida 3 V _s (V)	Incremento de Voltaje de salida 1 ΔV _s	Incremento de Voltaje de salida 2 ΔV _s	Incremento de Voltaje de salida 3 ΔV _s
1		-0.007	-0.021	-0.006			
					0.008	0.019	0.007
2		-0.015	-0.040	-0.013			
					0.007	0.017	0.005
3		-0.022	-0.057	-0.018			
					0.007	0.019	0.007
4		-0.029	-0.076	-0.025			
					0.007	0.017	0.005
5		-0.036	-0.093	-0.030			
					0.007	0.018	0.005
6		-0.043	-0.111	-0.035			
					ΣΔV _s 1 =0.036	ΣΔV _s 2 =0.090	ΣΔV _s 3 =0.029
					ΔV _s 1 prom =0.0072	ΔV _s 2 prom =0.018	ΔV _s 3 prom =0.0058

Para determinar los incrementos de voltaje se debe calcular la diferencia entre los resultados de la medición dos y la uno para el primer caso, en el segundo será la diferencia entre la medición tres y la dos, y así sucesivamente hasta completar los seis incrementos que se producirán al hacer siete mediciones.

Con posterioridad se determinan las deformaciones unitarias en cada una de las direcciones utilizando la expresión:

$$\varepsilon_p = \frac{4 \cdot \Delta V_s \text{ prom}}{V_e \cdot K \cdot K_f} \text{ (cuarto de puente)}$$

Dónde:

V_e - voltaje de entrada

K - factor del extensómetro (lo da el fabricante)

$\Delta V_s \text{ prom}$ – Valor promedio del Voltaje de salida

K_f - Ganancia

Para $K_f=500$ y $K=2.20$ se determinan las deformaciones unitarias en cada una de las direcciones:

$$\varepsilon_1 = \frac{4 \cdot 0.0072}{1 \cdot (2.20) \cdot (500)}$$

$$\varepsilon_1 = 2.62 \cdot 10^{-5}$$

$$\varepsilon_2 = \frac{4 \cdot 0.018}{1 \cdot (2.20) \cdot (500)}$$

$$\varepsilon_2 = 6.55 \cdot 10^{-5}$$

$$\varepsilon_3 = \frac{4 \cdot 0.0058}{1 \cdot (2.20) \cdot (500)}$$

$$\varepsilon_3 = 2.11 \cdot 10^{-5}$$

$$\varepsilon_1 = \frac{\varepsilon_1 + \varepsilon_3}{2} + \frac{1}{2} \sqrt{(\varepsilon_1 - \varepsilon_3)^2 + (2\varepsilon_2 - \varepsilon_1 - \varepsilon_3)^2}$$

$$\varepsilon_2 = \frac{\varepsilon_1 + \varepsilon_3}{2} - \frac{1}{2} \sqrt{(\varepsilon_1 - \varepsilon_3)^2 + (2\varepsilon_2 - \varepsilon_1 - \varepsilon_3)^2}$$

$$\varepsilon_1 = \frac{(2.62 + 2.11) \cdot 10^{-5}}{2} + \frac{1}{2} \sqrt{[(2.62 - 2.11) \cdot 10^{-5}]^2 + [2 \cdot (6.55 \cdot 10^{-5}) - 2.62 \cdot 10^{-5} - 2.11 \cdot 10^{-5}]^2}$$

$$\varepsilon_1 = 6.55 * 10^{-5}$$

$$\varepsilon_2 = \frac{(2.62 + 2.11) * 10^{-5}}{2} - \frac{1}{2} \sqrt{[(2.62 - 2.11) * 10^{-5}]^2 + [2 * (6.55 * 10^{-5}) - 2.62 * 10^{-5} - 2.11 * 10^{-5}]^2}$$

$$\varepsilon_2 = -1.83 * 10^{-5}$$

Se determinan las direcciones principales:

$$\operatorname{tg} 2\theta = \frac{2\varepsilon_2 - \varepsilon_1 - \varepsilon_3}{\varepsilon_1 - \varepsilon_3}$$

$$\tan 2\theta = \frac{2 * (6.55 * 10^{-5}) - 2.62 * 10^{-5} - 2.11 * 10^{-5}}{2.62 * 10^{-5} - 2.11 * 10^{-5}}$$

$$\theta = 0.75$$

Las tensiones principales se obtendrán con las expresiones:

$$E = 2 * 10^5 \text{ Mpa} \quad \mu = 0.3$$

$$\sigma_1 = E \left[\frac{\varepsilon_1 + \varepsilon_3}{2(1 - \mu)} + \frac{1}{2(1 + \mu)} \sqrt{(\varepsilon_1 - \varepsilon_3)^2 + (2\varepsilon_2 - \varepsilon_1 - \varepsilon_3)^2} \right]$$

$$\sigma_2 = E \left[\frac{\varepsilon_1 + \varepsilon_3}{2(1 - \mu)} - \frac{1}{2(1 + \mu)} \sqrt{(\varepsilon_1 - \varepsilon_3)^2 + (2\varepsilon_2 - \varepsilon_1 - \varepsilon_3)^2} \right]$$

$$\sigma_1 = 2 * 10^5 \left[\frac{(2.62 + 2.11) * 10^{-5}}{2(1 - 0.3)} + \frac{1}{2(1 + 0.3)} \sqrt{[(2.62 - 2.11) * 10^{-5}]^2 + [2 * (6.55 * 10^{-5}) - 2.62 * 10^{-5} - 2.11 * 10^{-5}]^2} \right]$$

$$\sigma_1 = 13.21 \text{ Mpa}$$

$$\sigma_2 = 2 * 10^5 \left[\frac{(2.62 + 2.11) * 10^{-5}}{2(1 - 0.3)} - \frac{1}{2(1 + 0.3)} \sqrt{[(2.62 - 2.11) * 10^{-5}]^2 + [2 * (6.55 * 10^{-5}) - 2.62 * 10^{-5} - 2.11 * 10^{-5}]^2} \right]$$

$$\sigma_2 = 0.3MPa$$

Se calcula a continuación el momento flector en la barra:

$$Mf = P * X$$

$$Mf = (3.86 * 10^{-3}) \cdot (30 \text{ cm})$$

$$Mf = 0.1158 \text{ kN} \cdot \text{cm}$$

Se calcula módulo de resistencia a la flexión:

$$W_x = \frac{b * h^3}{6}$$

$$W_x = \frac{3 \cdot (0.4)^2}{6}$$

$$W_x = 0.08 \text{ cm}^3$$

Se calcula la σ_T mediante la siguiente expresión:

$$\sigma_T = \frac{Mf}{W_x}$$

$$\sigma_T = \frac{0.1158 \text{ kN} \cdot \text{cm}}{0.08 \text{ cm}^3}$$

$$\sigma_T = 1.448 \text{ kN} / \text{cm}^2$$

$$\sigma_T = 14.48 \text{ Mpa}$$

Se calcula el % de error con los datos correspondientes:

$$\% \text{ Error} = \frac{\sigma_T - \sigma_P}{\sigma_T}$$

$$\% \text{ Error} = \frac{\sigma_T - \sigma_P}{\sigma_T} * 100$$

$$\% \text{ Error} = \frac{14.48 - 13.21}{14.48} * 100$$

$$\% \text{ Error} = 8.7\%$$

Tabla 2.4. Variaciones de voltaje con una ganancia de 1k

No	Carga P (kgf)	Voltaje de salida 1 V _s (V)	Voltaje de salida 2 V _s (V)	Voltaje de salida 3 V _s (V)	Incremento de Voltaje de salida 1 ΔV _s	Incremento de Voltaje de salida 2 ΔV _s	Incremento de Voltaje de salida 3 ΔV _s
1		-0.016	-0.037	-0.012			
					0.014	0.037	0.011
2		-0.030	-0.074	-0.023			
					0.014	0.037	0.011
3		-0.044	-0.111	-0.034			
					0.014	0.035	0.012
4		-0.058	-0.146	-0.046			
					0.014	0.036	0.012
5		-0.072	-0.182	-0.058			
					0.014	0.036	0.011
6		-0.086	-0.218	-0.069			
					ΣΔV _s 1 =0.070	ΣΔV _s 2 =0.181	ΣΔV _s 3 =0.057
					ΔV _s 1 prom =0.014	ΔV _s 2 prom =0.0362	ΔV _s 3 prom =0.0114

Para determinar los incrementos de voltaje se debe calcular la diferencia entre los resultados de la medición dos y la uno para el primer caso, en el segundo será la

diferencia entre la medición tres y la dos, y así sucesivamente hasta completar los seis incrementos que se producirán al hacer siete mediciones.

Con posterioridad se determinan las deformaciones unitarias en cada una de las direcciones utilizando la expresión:

$$\varepsilon_p = \frac{4 \cdot \Delta V_s \text{prom}}{V_e \cdot K \cdot K_f} \text{ (cuarto de puente)}$$

Donde:

V_e - voltaje de entrada

K - factor del extensómetro (lo da el fabricante)

$\Delta V_s \text{prom}$ – Valor promedio del Voltaje de salida

K_f - Ganancia

Para $K_f=1K$ y $K=2.20$ se determinan las deformaciones unitarias en cada una de las direcciones:

$$\varepsilon_1 = \frac{4 \cdot 0.014}{1 \cdot (2.20) \cdot (1000)}$$

$$\varepsilon_2 = \frac{4 \cdot 0.0362}{1 \cdot (2.20) \cdot (1000)}$$

$$\varepsilon_1 = 2.54 \cdot 10^{-5}$$

$$\varepsilon_2 = 6.58 \cdot 10^{-5}$$

$$\varepsilon_3 = \frac{4 \cdot 0.0114}{1 \cdot (2.20) \cdot (1000)}$$

$$\varepsilon_3 = 2.07 \cdot 10^{-5}$$

$$\varepsilon_1 = \frac{\varepsilon_1 + \varepsilon_3}{2} + \frac{1}{2} \sqrt{(\varepsilon_1 - \varepsilon_3)^2 + (2\varepsilon_2 - \varepsilon_1 - \varepsilon_3)^2}$$

$$\varepsilon_2 = \frac{\varepsilon_1 + \varepsilon_3}{2} - \frac{1}{2} \sqrt{(\varepsilon_1 - \varepsilon_3)^2 + (2\varepsilon_2 - \varepsilon_1 - \varepsilon_3)^2}$$

$$\varepsilon_1 = \frac{(2.54 + 2.07) * 10^{-5}}{2} + \frac{1}{2} \sqrt{[(2.54 - 2.07) * 10^{-5}]^2 + [2 * (6.58 * 10^{-5}) - 2.54 * 10^{-5} - 2.07 * 10^{-5}]^2}$$

$$\varepsilon_1 = 6.58 * 10^{-5}$$

$$\varepsilon_2 = \frac{(2.54 + 2.07) * 10^{-5}}{2} - \frac{1}{2} \sqrt{[(2.54 - 2.07) * 10^{-5}]^2 + [2 * (6.58 * 10^{-5}) - 2.54 * 10^{-5} - 2.07 * 10^{-5}]^2}$$

$$\varepsilon_2 = -1.98 * 10^{-5}$$

Se determinan las direcciones principales:

$$\operatorname{tg} 2\theta = \frac{2\varepsilon_2 - \varepsilon_1 - \varepsilon_3}{\varepsilon_1 - \varepsilon_3}$$

$$\tan 2\theta = \frac{2 \cdot (6.58 * 10^{-5}) - 2.54 * 10^{-5} - 2.07 * 10^{-5}}{2.54 * 10^{-5} - 2.07 * 10^{-5}}$$

$$\theta = 0.76$$

Las tensiones principales se obtendrán con las expresiones:

$$E = 2 * 10^5 \text{ Mpa} \quad \mu = 0.3$$

$$\sigma_1 = E \left[\frac{\varepsilon_1 + \varepsilon_3}{2(1 - \mu)} + \frac{1}{2(1 + \mu)} \sqrt{(\varepsilon_1 - \varepsilon_3)^2 + (2\varepsilon_2 - \varepsilon_1 - \varepsilon_3)^2} \right]$$

$$\sigma_2 = E \left[\frac{\varepsilon_1 + \varepsilon_3}{2(1 - \mu)} - \frac{1}{2(1 + \mu)} \sqrt{(\varepsilon_1 - \varepsilon_3)^2 + (2\varepsilon_2 - \varepsilon_1 - \varepsilon_3)^2} \right]$$

$$\sigma_1 = 2 * 10^5 \left[\frac{(2.54 + 2.07) * 10^{-5}}{2(1 - 0.3)} + \frac{1}{2(1 + 0.3)} \sqrt{[(2.54 - 2.07) * 10^{-5}]^2 + [2 * (6.58 * 10^{-5}) - 2.54 * 10^{-5} - 2.07 * 10^{-5}]^2} \right]$$

$$\sigma_1 = 13.16 \text{ Mpa}$$

$$\sigma_2 = 2 * 10^5 \left[\frac{(2.54 + 2.07) * 10^{-5}}{2(1 - 0.3)} - \frac{1}{2(1 + 0.3)} \sqrt{[(2.54 - 2.07) * 10^{-5}]^2 + [2 * (6.58 * 10^{-5}) - 2.54 * 10^{-5} - 2.07 * 10^{-5}]^2} \right]$$

$$\sigma_2 = 0MPa$$

Se calcula a continuación el momento flector en la barra:

$$Mf = P * X$$

$$Mf = (3.86 * 10^{-3}) * (30 \text{ cm})$$

$$Mf = 0.1158 \text{ kN} \cdot \text{cm}$$

Se calcula módulo de resistencia a la flexión:

$$W_x = \frac{b * h^3}{6}$$

$$W_x = \frac{3 * (0.4)^2}{6}$$

$$W_x = 0.08 \text{ cm}^3$$

Se calcula la σ_T mediante la siguiente expresión:

$$\sigma_T = \frac{Mf}{W_x}$$

$$\sigma_T = \frac{0.1158 \text{ kN} \cdot \text{cm}}{0.08 \text{ cm}^3}$$

$$\sigma_T = 1.448 \text{ kN/cm}^2$$

$$\sigma_T = 14.48 \text{ Mpa}$$

Se calcula el % de error con los datos correspondientes:

$$\% \text{ Error} = \frac{\sigma_T - \sigma_P}{\sigma_T}$$

$$\% \text{ Error} = \frac{\sigma_T - \sigma_P}{\sigma_T} * 100$$

$$\% \text{ Error} = \frac{14.48 - 13.16}{14.48} * 100$$

$$\% \text{ Error} = 9.11\%$$

Tabla 2.5. Variaciones de voltaje con una ganancia de 2k

No	Carga P (kgf)	Voltaje de salida 1 V _s (V)	Voltaje de salida 2 V _s (V)	Voltaje de salida 3 V _s (V)	Incremento de Voltaje de salida 1 ΔV _s	Incremento de Voltaje de salida 2 ΔV _s	Incremento de Voltaje de salida 3 ΔV _s
1		-0.031	-0.074	-0.024			
					0.029	0.071	0.022
2		-0.060	-0.145	-0.046	0.027	0.072	0.024
3		-0.087	-0.217	-0.070	0.030	0.074	0.021
4		-0.117	-0.291	-0.091	0.026	0.071	0.023
5		-0.143	-0.362	-0.114	0.028	0.070	0.022
6		-0.171	-0.432	-0.136			
					ΣΔV _s 1 =0.140	ΣΔV _s 2 =0.358	ΣΔV _s 3 =0.112
					ΔV _s 1 prom =0.0280	ΔV _s 2 prom =0.0716	ΔV _s 3 prom =0.0224

Para determinar los incrementos de voltaje se debe calcular la diferencia entre los resultados de la medición dos y la uno para el primer caso, en el segundo será la diferencia entre la medición tres y la dos, y así sucesivamente hasta completar los seis incrementos que se producirán al hacer siete mediciones.

Con posterioridad se determinan las deformaciones unitarias en cada una de las direcciones utilizando la expresión:

$$\varepsilon_p = \frac{4 \cdot \Delta V_s \text{prom}}{V_e \cdot K \cdot K_f} \text{ (cuarto de puente)}$$

Dónde:

V_e - voltaje de entrada

K - factor del extensómetro (lo da el fabricante)

$\Delta V_{s \text{prom}}$ – Valor promedio del Voltaje de salida

K_f - Ganancia

Para $K_f=2K$ y $K=2.20$ se determinan las deformaciones unitarias en cada una de las direcciones:

$$\varepsilon_1 = \frac{4 \cdot 0.0280}{1 \cdot (2.20) \cdot (2000)}$$

$$\varepsilon_1 = 2.54 \cdot 10^{-5}$$

$$\varepsilon_2 = \frac{4 \cdot 0.0716}{1 \cdot (2.20) \cdot (2000)}$$

$$\varepsilon_2 = 6.51 \cdot 10^{-5}$$

$$\varepsilon_3 = \frac{4 \cdot 0.0224}{1 \cdot (2.20) \cdot (2000)}$$

$$\varepsilon_3 = 2.04 \cdot 10^{-5}$$

$$\varepsilon_1 = \frac{\varepsilon_1 + \varepsilon_3}{2} + \frac{1}{2} \sqrt{(\varepsilon_1 - \varepsilon_3)^2 + (2\varepsilon_2 - \varepsilon_1 - \varepsilon_3)^2}$$

$$\varepsilon_2 = \frac{\varepsilon_1 + \varepsilon_3}{2} - \frac{1}{2} \sqrt{(\varepsilon_1 - \varepsilon_3)^2 + (2\varepsilon_2 - \varepsilon_1 - \varepsilon_3)^2}$$

$$\varepsilon_1 = \frac{(2.54 + 2.04) \cdot 10^{-5}}{2} + \frac{1}{2} \sqrt{[(2.54 - 2.04) \cdot 10^{-5}]^2 + [2 \cdot (6.51 \cdot 10^{-5}) - 2.54 \cdot 10^{-5} - 2.04 \cdot 10^{-5}]^2}$$

$$\varepsilon_1 = 6.5 \cdot 10^{-5}$$

$$\varepsilon_2 = \frac{(2.54 + 2.04) \cdot 10^{-5}}{2} - \frac{1}{2} \sqrt{[(2.54 - 2.04) \cdot 10^{-5}]^2 + [2 \cdot (6.51 \cdot 10^{-5}) - 2.54 \cdot 10^{-5} - 2.04 \cdot 10^{-5}]^2}$$

$$\varepsilon_2 = -1.91 \cdot 10^{-5}$$

Se determinan las direcciones principales:

$$\operatorname{tg} 2\theta = \frac{2\varepsilon_2 - \varepsilon_1 - \varepsilon_3}{\varepsilon_1 - \varepsilon_3}$$

$$\tan 2\theta = \frac{2 \cdot (6.51 \cdot 10^{-5}) - 2.54 \cdot 10^{-5} - 2.04 \cdot 10^{-5}}{2.54 \cdot 10^{-5} - 2.04 \cdot 10^{-5}}$$

$$\theta = 0.76$$

Las tensiones principales se obtendrán con las expresiones:

$$E = 2 \cdot 10^5 \text{ Mpa} \quad \mu = 0.3$$

$$\sigma_1 = E \left[\frac{\varepsilon_1 + \varepsilon_3}{2(1 - \mu)} + \frac{1}{2(1 + \mu)} \sqrt{(\varepsilon_1 - \varepsilon_3)^2 + (2\varepsilon_2 - \varepsilon_1 - \varepsilon_3)^2} \right]$$

$$\sigma_2 = E \left[\frac{\varepsilon_1 + \varepsilon_3}{2(1 - \mu)} - \frac{1}{2(1 + \mu)} \sqrt{(\varepsilon_1 - \varepsilon_3)^2 + (2\varepsilon_2 - \varepsilon_1 - \varepsilon_3)^2} \right]$$

$$\sigma_1 = 2 * 10^5 \left[\frac{(2.54 + 2.04) * 10^{-5}}{2(1 - 0.3)} + \frac{1}{2(1 + 0.3)} \sqrt{[(2.54 - 2.04) * 10^{-5}]^2 - [2 * (6.51 * 10^{-5}) - 2.54 * 10^{-5} - 2.04 * 10^{-5}]^2} \right]$$

$$\sigma_1 = 13.04 MPa$$

$$\sigma_2 = 2 * 10^5 \left[\frac{(2.54 + 2.04) * 10^{-5}}{2(1 - 0.3)} - \frac{1}{2(1 + 0.3)} \sqrt{[(2.54 - 2.04) * 10^{-5}]^2 - [2 * (6.51 * 10^{-5}) - 2.54 * 10^{-5} - 2.04 * 10^{-5}]^2} \right]$$

$$\sigma_2 = 0.04 MPa$$

Se calcula a continuación el momento flector en la barra:

$$Mf = P * X$$

$$Mf = (3.86 * 10^{-3}) * (30 \text{ cm})$$

$$Mf = 0.1158 \text{ kN} \cdot \text{cm}$$

Se calcula módulo de resistencia a la flexión:

$$W_x = \frac{b * h^3}{6}$$

$$W_x = \frac{3 * (0.4)^3}{6}$$

$$W_x = 0.08 \text{ cm}^3$$

Se calcula la σ_T mediante la siguiente expresión:

$$\sigma_T = \frac{Mf}{W_x}$$

$$\sigma_T = \frac{0.1158 \text{ kN} \cdot \text{cm}}{0.08 \text{ cm}^3}$$

$$\sigma_T = 1.448 \text{ kN/cm}^2$$

$$\sigma_T = 14.48 \text{ Mpa}$$

Se calcula el % de error con los datos correspondientes:

$$\% \text{ Error} = \frac{\sigma_T - \sigma_P}{\sigma_T}$$

$$\% \text{ Error} = \frac{\sigma_T - \sigma_P}{\sigma_T} * 100$$

$$\% \text{ Error} = \frac{14.48 - 13.04}{14.48} * 100$$

$$\% \text{ Error} = 9.94\%$$

Como se puede apreciar el porcentaje de error en todos los casos está dentro de lo permitido ($\pm 10\%$), no obstante la ganancia de 100 es la que nos brinda un error menor. Por tal motivo se tomará esta ganancia para la realización de la práctica.

Conclusiones parciales

- ❖ Para la realización de la práctica se selecciona una roseta que tiene una resistencia de $120\ \Omega$ y un voltaje de $1\ \text{V}$.
- ❖ Se realiza el montaje de tres circuitos, es decir se montan tres cuartos de puente de Wheatstone, uno para cada galga de la roseta.
- ❖ Al realizar la práctica con las diferentes ganancias que permite el puente YE3817 se pudo constatar que con 100 de ganancia el error que se produce en las mediciones es menor, por lo se decide tomar este valor.

Capítulo III. Guía para la realización del laboratorio.

3.1. Introducción

El objetivo fundamental del montaje de este laboratorio es con fines docentes, tanto en el pregrado para la impartición de la asignatura Resistencia de Materiales, como en el postgrado en la impartición de la signatura Teoría de la Elasticidad. Con ese fin es necesario preparar una guía que les permita a los estudiantes realizar la práctica, organizar y procesar los datos obtenidos en la realización de la misma y finalmente entregar el informe. En este capítulo se presenta una guía que contiene los fundamentos teóricos, la técnica operatoria, las tablas para la presentación de los resultados y las principales fórmulas utilizadas en el procesamiento de los datos obtenidos.

3.2. Guía para la realización del laboratorio.

Título: Medición de tensiones utilizando galgas extensométricas tipo roseta de deformación.

Objetivo general

- ❖ Capacitar al alumno para la realización de mediciones eléctricas de magnitudes mecánicas mediante la utilización de rosetas de deformaciones.

Objetivos específicos

- ❖ Adquirir habilidades en el montaje de galgas extensométricas tipo roseta de deformaciones.
- ❖ Determinar deformaciones principales, tensiones principales y direcciones principales midiendo deformaciones a lo largo de tres ejes.
- ❖ Aplicar las unidades que se usan en el Sistema Internacional de Unidades.

Fundamentos teóricos

La determinación de las deformaciones y esfuerzos en un elemento estructural sometido a diferentes tipos de cargas se efectúa a través de diversos métodos

experimentales, tales como: galgas extensométricas, fotoelasticidad, lacas frágiles, entre los más usados.

Estos métodos permiten determinar las deformaciones y con ellas determinar el estado de esfuerzos o tensiones de una pieza, midiendo con los instrumentos apropiados algún cambio en las propiedades físicas de ella, o bien, de un modelo, al ser sometido a una cierta sollicitación, ya sea, tracción, flexión o torsión.

Existen diferentes extensómetros eléctricos donde la deformación un material puede producir sobre él variaciones de la resistencia óhmica, inducción magnética o capacidad eléctrica que pueden ser medidas por medio de un circuito eléctrico apropiado. Estas variaciones son leídas, amplificadas e incluso registradas. De los distintos extensómetros, los basados en la variación de resistencia óhmica son los más extendidos, los cuales reciben el nombre de galgas extensométricas.

Las galgas extensométricas fueron introducidas por Runge y Simmons a finales de los años treinta en Estados Unidos. Fundamentalmente, una galga extensométrica es un hilo conductor muy fino colocado sobre un soporte aislante y formando una rejilla en la que la mayor parte de su longitud está orientada en una dirección (ver figura). Los extremos del hilo son más gruesos y sirven para conectar la galga con el exterior. Mientras que la base aislante se encola sobre la superficie del cuerpo donde se desea realizar la medición y en la dirección en la que se quieren conocer, transmitiéndose de esta manera las deformaciones de la pieza al hilo conductor de la galga (Fig.3.1).

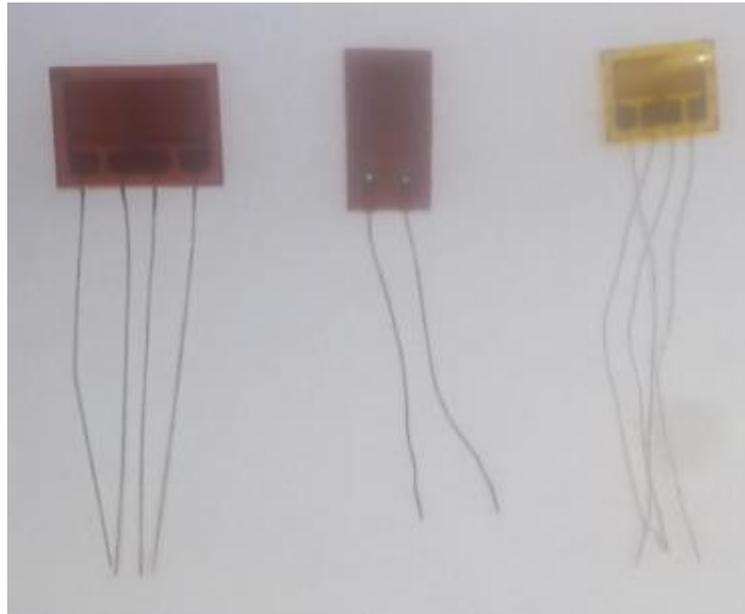


Fig.3.1. Galgas extensométricas

Cuando la galga se une a la pieza, se admite que la deformación del hilo es la misma que la deformación que experimenta la superficie donde está ubicada. Para ello, la cola que une la galga con el cuerpo a estudiar debe transmitir las deformaciones del cuerpo a la galga. En estas condiciones la cola trabaja bajo un esfuerzo cortante, siendo importante que la cola tenga una buena resistencia a este tipo de esfuerzos. Además, conviene que la capa de cola sea lo más delgada posible a fin que la deformación de la galga sea fidedigna.

La resistencia eléctrica de una banda se define como la resistencia óhmica entre sus conectores de soldadura. Su valor se calcula en función de la resistividad del material ρ , la longitud L del hilo conductor y el área A de la sección transversal del hilo según:

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

(3.1)

Comercialmente se fabrican bandas con resistencias nominales de 120, 350, 600 y 700 $m\Omega$.

El fundamento físico que permite la medición de estas deformaciones es la variación de la resistencia eléctrica de un conductor cuando se deforma enunciada por la ley de Bridgman, que establece que la variación de la resistividad eléctrica de

un conductor cuando se deforma es proporcional a la variación de volumen que experimenta:

$$\frac{\Delta\rho}{\rho} = c \frac{\Delta V}{V}$$

(3.2)

Siendo $V = A \cdot L$ el volumen del hilo conductor.

Factor de banda

La sensibilidad a la deformación de una banda extensométrica, o *factor de banda*, es una constante de proporcionalidad entre el cambio relativo de resistencia y la deformación medida:

$$\frac{\Delta R}{R} = K \frac{\Delta L}{L} \Rightarrow K\varepsilon = \frac{\Delta R}{R} \quad (3.3)$$

Esta constante K no tiene dimensiones. Su valor se obtiene por simple medición sobre cada paquete de bandas fabricado. Un valor típico de factor de banda es $K = 2$.

Puente de Wheatstone

Para evaluar las variaciones de resistencia experimentadas por las galgas cuando se deforman, éstas se conectan en un circuito eléctrico y se mide la variación de la tensión eléctrica en ellas. Las resistencias de las bandas tienen valores comprendidos entre 0.001Ω y 0.72Ω , por lo que las variaciones que se producen son muy pequeñas y exigen métodos capaces de detectar incrementos de resistencia de 0.0001Ω .

El circuito del *puente de Wheatstone* que se representa en la figura 3.1 permite medir estas diferencias de potencial y, según cuántas galgas se utilicen y dónde se conecten, amplificar la señal producida por la deformación para facilitar su lectura.

El puente de Wheatstone está formado por cuatro resistencias unidas en serie – paralelo, de las cuales una o varias de ellas son galgas eléctricas o extensómetros, mientras que las restantes son simples resistencias eléctricas que completan el

diseño del puente. La figura 1.2 muestra dos ilustraciones diferentes del puente de Wheatstone que son idénticas eléctricamente.

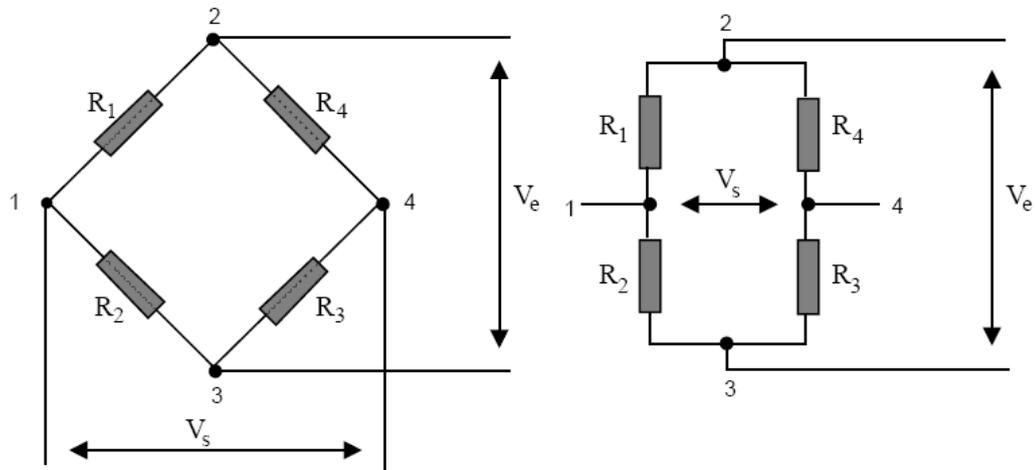


Fig. 3.1. Puente de Wheatstone

Las cuatro ramas del circuito están formadas por las resistencias R_1 , R_2 , R_3 y R_4 . Los puntos 2 y 3 del puente designan las conexiones para el voltaje de excitación del puente (V_e). La señal de medida es voltaje de salida del puente (V_s), que se obtiene en los puntos 1 y 4.

La alimentación del puente se puede realizar en corriente continua ó alterna.

Condición de equilibrio del Puente

Se dice que el puente está equilibrado cuando no hay diferencia de potencial entre los puntos 1 y 4, es decir, $V_s = 0$. Para ello, se debe cumplir la condición:

$$R_1 \cdot R_3 = R_2 \cdot R_4 \quad (3.4)$$

Partiendo de esta condición, una sollicitación de la estructura dará lugar a una deformación que afectará al extensómetro adosado a la misma. De esta deformación se derivará un cambio de resistencia eléctrica que desequilibrará el puente, haciendo variar la aguja del voltímetro de la posición inicial cero, al haberse originado una diferencia de potencial entre 1 y 4.

Ley de signos:

La expresión que define el comportamiento del puente de Wheatstone para el caso más general en el que las cuatro resistencias sean bandas extensométricas pegadas a un sólido elástico que se deforma es:

$$\frac{\Delta V_s}{V_e} = \frac{1}{4} \left(\frac{\Delta R_1}{R_1} - \frac{\Delta R_2}{R_2} + \frac{\Delta R_3}{R_3} - \frac{\Delta R_4}{R_4} \right) \quad (3.5)$$

De esta expresión se deduce que las variaciones de resistencia influyen con distinto signo sobre la tensión de salida según la rama considerada. Partiendo de una resistencia cualquiera, se cumple la regla de que las resistencias situadas en ramas adyacentes influyen en sentido contrario, mientras que la de la rama opuesta lo hace en el mismo sentido. En la **figura 3.15** se representa esta regla, llamada “regla de los signos”, muy importante a efectos prácticos, pues indica cómo tienen que estar montadas las galgas en cada caso [17].

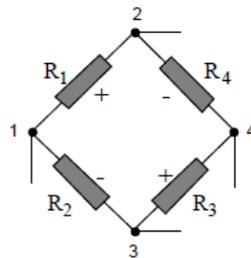


Figura 3.2. Ley de los signos

La expresión anterior también muestra que los cambios relativos de resistencias de cada rama del puente es el factor gobernante en el equilibrio del puente y no los cambios absolutos de resistencia.

Teniendo en cuenta (3.4), la ecuación de comportamiento del puente (3.5) puede reescribirse en función de las deformaciones longitudinales (ε):

$$\frac{\Delta V_s}{V_e} = \frac{1}{4} (\varepsilon_1 - \varepsilon_2 + \varepsilon_3 - \varepsilon_4) \quad (3.6)$$

Esta ecuación indica que la variación unitaria del voltaje que se mide entre los puntos 1 y 4 es directamente proporcional a la suma algebraica de las deformaciones que sufren las bandas que componen el puente de medida.

Técnica operatoria

Primeramente se realizará la medición de los parámetros físicos de la barra (Fig. 3.3) y se llenará la Tabla 3.1., estos son:

- ❖ Ancho de la barra (b).
- ❖ Alto de la sección transversal de la barra (t).
- ❖ Distancia del centro de la roseta al punto de aplicación de la carga (L).

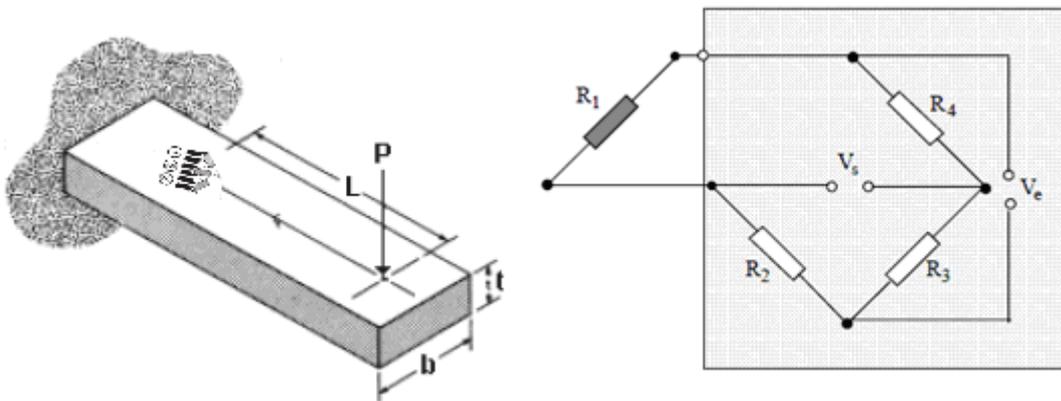


Fig.3.3. Dimensiones que deben tomarse en la práctica.

Tabla 3.1. Datos de la barra.

Material	Módulo de Young	Ancho (b) mm	Altura (t) mm	Brazo (L) mm

Como se aprecia en la Fig.3.3. se utilizará un cuarto de puente para cada galga componente de la roseta, es decir se montarán tres circuitos independientes (Fig. 3.4).



Fig 3.4. Montaje de los tres puentes necesarios para la medición con la roseta.

Para la realización de la práctica se tomarán los siguientes parámetros:

- ❖ Corriente directa.
- ❖ Voltaje de alimentación : 1 V
- ❖ Ganancia: 100

Se conectará cada circuito a un canal de medición del puente YE3817. La carga se aplicará mediante la colocación de pesas en el gancho que está en el extremo de la barra. Cada pesa será de 3,86 g. Se coloca la primera pesa y se realiza la lectura de la variación de voltaje en cada canal y se llenarán las cuatro primeras columnas de la tabla 3.2. Se realizarán 6 aplicaciones de carga.

Tabla 3.2. Variaciones de voltaje.

No	Carga P (kgf)	Voltaje de salida 1 V	Voltaje de salida 2 V	Voltaje de salida 3 V	Incremento de Voltaje de salida 1 ΔV_s	Incremento de Voltaje de salida 2 ΔV_s	Incremento de Voltaje de salida 3 ΔV_s
1							
2							
3							
4							
5							
6							
					$\sum \Delta V_s 1 =$	$\sum \Delta V_s 2 =$	$\sum \Delta V_s 3 =$
					$\Delta V_s 1_{prom} =$	$\Delta V_s 2_{prom} =$	$\Delta V_s 3_{prom} =$

Como parte del procesamiento de los datos se determinarán los incrementos de voltaje (al hacerse 6 mediciones serán 5 incrementos) y se llenarán las últimas tres columnas. A partir de las tres variaciones de voltaje promedio (ΔV_s prom) se calculan las deformaciones con la expresión:

$$\epsilon_p = \frac{4 \cdot \Delta V_s \text{ prom}}{V_e \cdot K \cdot K_f} \text{ (cuarto de puente)}$$

Dónde:

V_e - voltaje de entrada

K - factor del extensómetro (lo da el fabricante)

ΔV_{sprom} – Valor promedio del Voltaje de salida

Kf - Ganancia

En este caso Kf=100 y K=2.20.

Posteriormente se determinan las deformaciones principales:

$$\varepsilon_1 = \frac{\varepsilon_1 + \varepsilon_3}{2} + \frac{1}{2} \sqrt{(\varepsilon_1 - \varepsilon_3)^2 + (2\varepsilon_2 - \varepsilon_1 - \varepsilon_3)^2}$$
$$\varepsilon_2 = \frac{\varepsilon_1 + \varepsilon_3}{2} - \frac{1}{2} \sqrt{(\varepsilon_1 - \varepsilon_3)^2 + (2\varepsilon_2 - \varepsilon_1 - \varepsilon_3)^2}$$

Se determinan las direcciones principales:

$$\operatorname{tg} 2\theta = \frac{2\varepsilon_2 - \varepsilon_1 - \varepsilon_3}{\varepsilon_1 - \varepsilon_3}$$

Las tensiones principales se obtendrán con las expresiones:

$$E = 2 \cdot 10^5 \text{ Mpa} \quad \mu = 0.3$$

$$\sigma_1 = E \left[\frac{\varepsilon_1 + \varepsilon_3}{2(1-\mu)} + \frac{1}{2(1+\mu)} \sqrt{(\varepsilon_1 - \varepsilon_3)^2 + (2\varepsilon_2 - \varepsilon_1 - \varepsilon_3)^2} \right]$$
$$\sigma_2 = E \left[\frac{\varepsilon_1 + \varepsilon_3}{2(1-\mu)} - \frac{1}{2(1+\mu)} \sqrt{(\varepsilon_1 - \varepsilon_3)^2 + (2\varepsilon_2 - \varepsilon_1 - \varepsilon_3)^2} \right]$$

Estas serán las tensiones experimentales.

Determinación de la tensión por las ecuaciones teóricas de Resistencia de Materiales.

Se calcula a continuación el momento flector en la barra:

$$Mf = P \cdot L$$

Se calcula módulo de resistencia a la flexión:

$$W_x = \frac{b \cdot t^2}{6}$$

Se calcula la tensión teórica σ_T mediante la siguiente expresión:

$$\sigma_T = \frac{Mf}{W_x}$$

Y se determina el porcentaje de error:

$$\% \text{ Error} = \frac{\sigma_T - \sigma_P}{\sigma_T}$$

El informe debe terminar con las conclusiones que estarán enfocadas a analizar el porcentaje de error calculado.

Conclusiones parciales

- ❖ Para la realización de la práctica se utiliza una roseta de deformaciones tipo rectangular. Es decir una roseta con tres galgas colocadas a 90° , que tienen una resistencia de 120Ω .
- ❖ Se montan tres circuitos de cuarto de puente de Wheatstone, uno para cada galga de la roseta y se conectan los mismos a tres de los canales que trae el puente YE3817.
- ❖ Se confeccionó la guía para la práctica de laboratorio. Esta guía tiene los fundamentos teóricos, técnica operatoria, los cuadros de anotaciones y las fórmulas que deben utilizarse en el procesamiento de los datos.

Conclusiones generales

- ❖ La extensometría eléctrica tiene una gran utilidad para la determinación experimental de tensiones. Su principio de funcionamiento se basa en la variación de resistencia de un alambre por el que pasa una corriente eléctrica. Existe gran variedad de galgas extensométricas, dentro de las mismas las más utilizadas son las llamadas rosetas de deformaciones, que no son más que dos o más galgas distribuidas según un arreglo establecido.
- ❖ Se realizó el montaje de una práctica de laboratorio en la que se miden las tensiones en una barra sometida a flexión utilizando una roseta de deformación. Los parámetros para esta práctica son: roseta tipo rectangular con una resistencia de 120Ω ; voltaje de alimentación 1V; se utilizará una ganancia de 100.
- ❖ Se desarrolló la guía para la realización de la práctica de laboratorio. Esta guía incluye los fundamentos teóricos, la técnica operatoria, los cuadros para la toma de datos y las fórmulas que se utilizarán en el procesamiento de los resultados.

Recomendaciones

- ❖ Realizar el montaje de otras prácticas utilizando diferentes tipos de rosetas.
- ❖ Fabricar los dispositivos necesarios para hacer otras prácticas en las que las probetas estén sometidas a otras sollicitaciones como torsión, tracción compresión y la combinación de varias sollicitaciones.

Bibliografía

- 1- Hidalgo F. “Análisis experimental de esfuerzos, aplicaciones con galgas extensométricas”. Tesis de Maestría. Universidad Autónoma de Nuevo León. México. 1995
- 2-Badiola V. “Extensometría”. 2004.
www.imac.unavarra.es/web_imac/pages/docencia/asignaturas/DyCDM_Cap7.pdf
- 3- Hoffman K. “Una introducción a la medición mediante bandas extensométricas”. Editor Hottinger Baldwin Messtechnik GmbH. 1989.
- 4- Yapur, M., Orellana, J., Tello, D. “Medición de esfuerzos y deformaciones en barras metálicas utilizando galgas extensométricas”.
www.dspace.espol.edu.ec/.../1/Medición%20de%20Esfuerzos%20y%20
- 5- Sosa J. “Galgas extensométricas”.
www.ing.unlp.edu.ar/electrotecnia/procesos/apuntes/Strain_Gages_1.pdf
- 6- Araujo L. Simulación y análisis del comportamiento mecánico de una tapa para pozo de drenaje utilizando Rosetas de deformación. Tesis de grado. Escuela Politécnica de Ejército. Sangolquí. 2006
- 7- Alzate E. et al. Medidores de deformaciones por resistencia: Galgas extensométricas. Scientia et Técnica. Año XIII, No 34. Mayo 2007. ISSN 0122-1701.
- 8- Dally J. Riley W. Experimental Stress Analysis. Editora McGraw Hill. ISBN 0070152187. 1991
- 9- Gittins N. Short Guide to Strain Gauging Methods. HBM measurement with confidence. www.hbn.com
- 10- VISHAY PRECISION GROUP. Strain Gage Selection: Criteria, Procedures, Recomendations. Tech Note TN-TN-505-4
- 11- Galgas extensométricas. www.wikipedia.com
- 12- Moreno I. Galgas extensométricas. www.ib.cnea.gov.ar/...de.../22-Galgas%20extensiometricas.pdf?

13-BEER, FERDINAND P,;JOHNSTON, E, Rusell,JR,;DEWOLF,John.,*Mecánica de materiales.4ta*, Edición, McGraw Hill Interamericana Editores, Mexico, 2006

14- Idrovo P., Quintanilla L. Aplicación de galgas extensométricas en el laboratorio de mecánica de materiales de la Carrera de Ingeniería Mecánica para la obtención de deformaciones en elementos sometidos a cargas combinadas. Tesis de grado. Universidad Politécnica Salesana. 2010

15- Rodríguez D. Montaje y puesta a punto del puente extensométrico YE3817. Tesis de Grado. UCLV. 2014