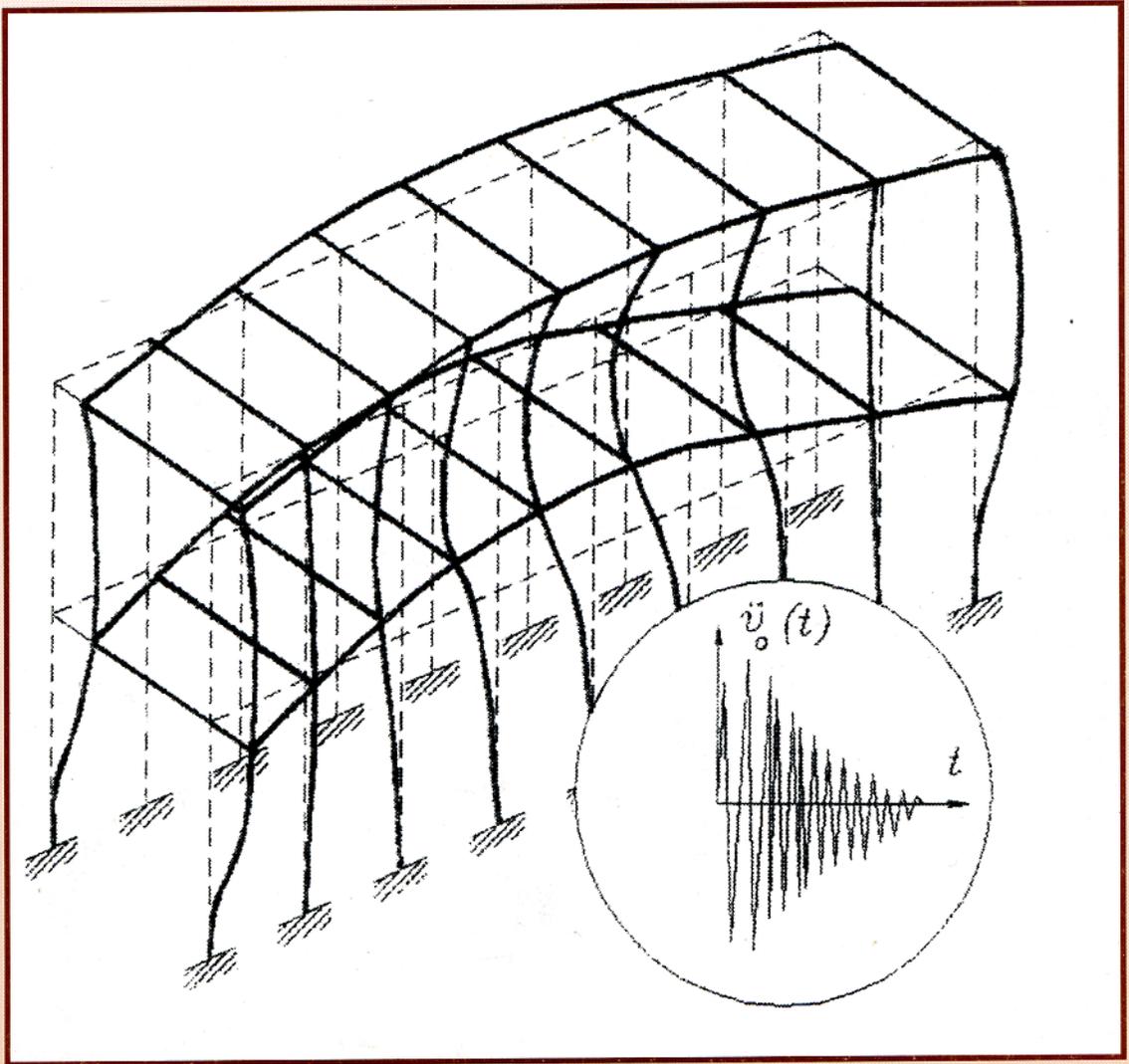


# Ingeniería

Revista de la Universidad de Costa Rica  
Julio/Diciembre 1997 VOLUMEN 7 Nº 2



# INGENIERIA

Revista Semestral de la Universidad de Costa Rica  
Volumen 7, Julio/Diciembre 1997 Número 2

## DIRECTOR

Rodolfo Herrera J.

## CONSEJO EDITORIAL

Víctor Hugo Chacón P.

Ismael Mazón G.

Domingo Riggioni C.

## CORRESPONDENCIA Y SUSCRIPCIONES

Editorial de la Universidad de Costa Rica  
Apartado Postal 75  
2060 Ciudad Universitaria Rodrigo Facio  
San José, Costa Rica

## CANJES

Universidad de Costa Rica  
Sistema de Bibliotecas, Documentación e Información  
Unidad de Selección y Adquisiciones-CANJE  
Ciudad Universitaria Rodrigo Facio  
San José, Costa Rica

### Suscripción anual:

Costa Rica: ₡ 1 000,00

Otros países: US \$ 25,00

### Número suelto:

Costa Rica: ₡ 750,00

Otros países: \$ 15,00



# EXTENSOMETRÍA: PRUEBAS CON GALGAS DE DEFORMACIÓN

Horacio Vásquez Céspedes<sup>1</sup>

## Resumen

En este artículo se presenta una investigación realizada con galgas de deformación, puentes de *Wheatstone* y vigas de aluminio y acero cargadas en voladizo. Tal investigación pretendió generar experiencia y conocimiento en aplicaciones de galgas de deformación. Se instalaron galgas utilizando productos adquiridos en comercios especializados en equipo extensométrico y también con productos equivalentes adquiridos en el mercado nacional, con el propósito de comparar el comportamiento de las galgas en ambos casos.

## Summary

This article presents results of a research on strain gages, Wheatstone Bridges, and aluminum and iron beams loaded in cantilever. This research pretended to generate experience and knowledge about strain gage applications. With the purpose of comparing the behavior of the gages, their installation was performed utilizing specialized equipment acquired from foreign companies dedicated to sell this kind of products as well as with equivalent equipment acquired locally.

## 1. INTRODUCCIÓN

Esta investigación surgió debido a una necesidad por comprobar la lectura de deformación unitaria obtenida a partir de galgas de deformación y medidores de deformación. Antes de llegar a cualquier conclusión en una aplicación, en particular de las galgas de deformación, es necesario y conveniente haber experimentado, calibrar el equipo que mide deformaciones, y comprender, adecuadamente, el funcionamiento y la utilidad en la medición de deformaciones del circuito llamado puente de *Wheatstone*.

El objetivo de este trabajo fue comprobar el funcionamiento de las galgas cuando la preparación de la superficie y la instalación se hacen con productos disponibles en el mercado nacional, sustituyendo a otros productos que se venden específicamente para extensometría. Esto se debe a que algunas compañías disponen de materiales muy específicos para la

preparación de la superficie y para pegar las galgas, los cuales son relativamente caros y difíciles de adquirir en nuestro país, de ahí que se pretenda reemplazarlos por materiales disponibles en el mercado local y que, según se han comprobado, pueden ejecutar la misma tarea. Una desventaja de los materiales de catálogo para extensometría es que se vencen rápidamente y por lo tanto no se pueden almacenar por largo tiempo para su futura utilización. La sustitución de un producto por otro no se lleva a cabo aleatoriamente, sino más bien, basándose en la experiencia de otros comercios y experimentadores y en las etiquetas de los productos. Es razonable afirmar que la superficie donde se va a instalar la galga se puede preparar con materiales del mercado local, utilizando lija, amoníaco, cetona (etil metil), ácido fosfórico, y otros. También, es posible instalar galgas con goma de rápido secado y alta resistencia como la que se vende en las ferreterías locales. Sin embargo, a la hora de utilizar este tipo de materiales, aparecerán cuestionamientos acerca de la temperatura de

<sup>1</sup> Ing. M.Sc. Escuela de Ingeniería Mecánica, Universidad de Costa Rica

operación de esta goma, de su tiempo de curado, de su capacidad de deformación, lo cual sólo se puede aclarar con más experimentación. En esta investigación no se pretende sustituir todos los productos utilizados por las grandes compañías que venden equipo extensométrico, sino solamente los productos que se agotan rápidamente después de instalar unas pocas galgas. Se esperaban resultados muy similares con ambos métodos de instalación de las galgas, pues el requisito fundamental para el buen funcionamiento de una galga de deformación es una superficie bien preparada y una galga totalmente adherida a la superficie.

Se instalaron varias galgas de deformación en vigas preparadas para ser colocadas en voladizo y sujetas a una carga cortante en su extremo libre. Debido a esta carga y al momento producido, se generan esfuerzos, en las superficies superior e inferior de la viga, los cuales son detectados por las galgas.

## 2. PUENTE DE WHEATSTONE

La figura 1 presenta a un circuito eléctrico llamado puente de *Wheatstone*. Este consiste en un arreglo de cuatro resistencias:  $R$ ,  $R_1$ ,  $R_2$ , y  $R_3$ ; ordenadas de la manera mostrada, de forma tal que por medio de la medición del voltaje de salida,  $V_0$ , y el voltaje de entrada  $V_i$ , se pueden medir cambios en la resistencia eléctrica,  $\Delta R$ , de la galga de deformación,  $R$ . Cuando se coloca una sola galga, o resistencia variable, se forma una configuración llamada cuarto de puente.

La tarea que ejecutan la resistencia  $R_4$  y el potenciómetro  $R_t$  es balancear o anular el circuito. O sea, se permite ajustar el voltaje de salida a cero cuando no existe un cambio en la resistencia eléctrica de la galga, ésto es cuando  $\Delta R = 0$ . El voltaje de salida generalmente no es cero cuando no hay deformación en la galga debido a que las resistencias del puente no siempre son idénticas.

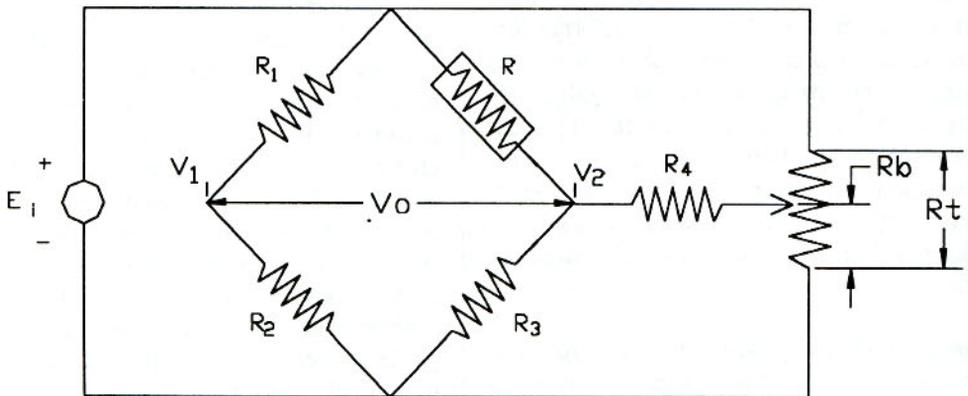


Figura 1. Cuarto de puente de *Wheatstone* con circuito de balanceo

Se estudio el funcionamiento del puente de *Wheatstone* (figura 1) utilizando resistencias  $R_1$ ,  $R_2$ , y  $R_3$  de  $350\Omega$ . En lugar de la resistencia  $R$  se utilizó un simulador de galgas de deformación modelo V/E-40, el cual es un instrumento especial de resistencias variables

diseñado para lograr alta exactitud en incrementos de resistencia tan bajos como  $0,01\Omega$ . Así, se utilizó este instrumento para simular el funcionamiento de una galga de deformación, y por lo tanto funcionó para medir

la exactitud de la medición y para calibrar los medidores de deformación.

Los resultados obtenidos al medir el voltaje de salida del puente de *Wheatstone*,  $V_0$ , para diferentes cambios,  $\Delta R$ , en la resistencia  $R$ , se

presentan en la tabla 1. Los resultados son tanto experimentales como teóricos. La ecuación (1) presenta la relación teórica que existe entre los parámetros que forman parte del arreglo mostrado en la figura 1.

(1)

$$V_2 = \frac{(R_4 R_t + R_b R_t - R_b^2 + (R + \Delta R) R_b) R_3}{((R + \Delta R)(R_4 R_t + R_b R_t - R_b^2 + R_3 R_t) + (R_4 R_t + R_b R_t - R_b^2) R_3)} V_1$$

De la tabla 1 se puede observar como el error en los datos encontrados experimentalmente es casi despreciable con respecto al valor teórico esperado.

El gráfico de la figura 2 representa la relación lineal existente entre la variación en la resistencia eléctrica,  $\Delta R$ , y el voltaje de salida,  $V_0$ , en la configuración de cuarto de puente de *Wheatstone* con circuito de anulación. El gráfico es el mismo tanto para los resultados teóricos como experimentales, ya que resultaron ser casi idénticos. Este resultado es muy importante debido a los posibles resultados que se pueden obtener con un puente de *Wheatstone*,

una fuente de voltaje y un voltímetro con resolución de al menos 0,01 mV. Pues en caso de que un medidor de deformación no se encuentre disponible o que así se quiera, se podría utilizar este circuito conectando su salida a un voltímetro o a una tarjeta de adquisición de datos para guardar un registro de las deformaciones, a las cuales la galga de deformación es sometida.

Tabla 1. Voltaje de salida en el puente de *Wheatstone* debido a cambio de resistencia en un cuarto del puente.

$\Delta R$ (ohms)	$V_0$ Prom. Exp. (mV)	$V_0$ Teórico (mV)	%error
0,00	0,000	0	0,00
0,01	0,	0,101	3,96
0,02	0,205	0,202	1,49
0,03	0,305	0,303	0,66
0,04	0,405	0,404	0,25
0,05	0,505	0,505	0,00
0,06	0,610	0,606	0,66
0,07	0,705	0,707	-0,28
0,08	0,805	0,808	-0,37
0,09	0,905	0,91	-0,55
0,10	1,010	1,011	-0,10
1,00	10,120	10,093	0,27
2,00	20,190	20,16	0,15
3,00	30,250	30,188	0,21
4,00	40,280	40,191	0,22
5,02	50,280	50,164	0,23
6,00	60,250	60,108	0,24
7,00	70,190	70,022	0,24
8,00	80,110	79,907	0,25
9,00	89,990	89,762	0,25
10,00	99,820	99,589	0,23
11,00	109,670	109,386	0,26
20,00	196,620	196,284	0,17
30,00	290,780	290,209	0,20
40,00	382,280	381,482	0,21

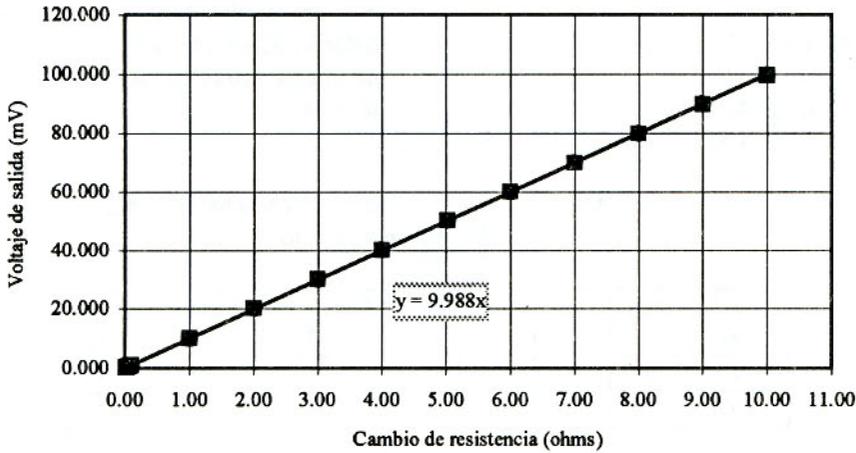


Figura 2. Voltaje de salida contra cambio de la resistencia

A continuación se presentan tres experiencias obtenidas con la instalación de galgas de deformación en vigas que se cargaron en voladizo.

### 2.1 Barra de Sección Circular en Flexión

Este experimento se realizó con la intención de obtener deformaciones pequeñas, menores o cercanas a 35 micras, con una galga de deformación instalada en la superficie de la viga, esta última, sujeta a flexión. Se realizó un

experimento con una barra circular de aluminio de 3,200 cm de diámetro, la cual se empotró en voladizo, para ser cargada con diferentes pesos en el extremo libre, como se ilustra en la figura 3.. Se instaló una galga de deformación en su superficie más alta con el fin de determinar la deformación unitaria longitudinal debido al momento flector causado por las cargas. Los materiales utilizados para preparar la superficie y pegar la galga fueron originales de una de las compañías que comercia equipo extensométrico.

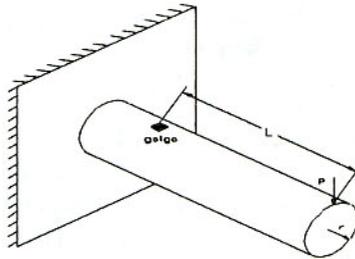


Figura 3. Barra circular en voladizo

Los parámetros presentados en la figura 3 representan la fuerza P, el radio r, y la longitud L desde el punto de aplicación de P hasta el centro de la galga de deformación. Se determinó que L= 52,8 cm y D=3,200 cm. Las pruebas se llevaron a cabo midiendo la

deformación indicada por la galga en un medidor de deformaciones modelo P-3500. Las deformaciones obtenidas al cargar la barra con diferentes masas en su extremo se presentan en la tabla 2.

Tabla 2. Cargas y deformaciones en la barra de sección circular de aluminio

Masa (g)	Def <sub>1</sub>	Def <sub>2</sub>	Def <sub>3</sub>	Def <sub>4</sub>	Def <sub>5</sub>	Def <sub>6</sub>	Def <sub>7</sub>	Promedio (micras)
0	0	0	0	0	0	0	0	0,00
100	2	2,5	2,5	3,5	2,5	2	2,5	2,50
200	4,5	5,5	5	5,5	5,5	4,5	5	5,07
300	7	8	7,5	7,5	7,5	7	7,5	7,43
400	9	10,5	10	10,5	10,5	9,5	10	10,00
500	12	12,5	12,5	12,5	12,5	12	12,5	12,36
600		15	15	15,5	15	14,5	14,5	14,92
700		17,5	17,5	17,5	17,5	16,5	17	17,25
800		20	19,5	20,5	20	19,5	20	19,92
900		22,5	22	22,5	22,5	21,5	22	22,17
1000	24	24,5	24,5	25,5	25	24	24	24,50
1100	26,5	27	27	27,5	27,5	26,5	27	27,00
1200	29	29,5		30		29	29,5	29,40
1300						31,5	32	31,75
1400						34	34,5	34,25
1500						36,5	36,5	36,50

Se conocían los resultados teóricos esperados y se representaron en la figura 4 junto con los resultados experimentales, con el propósito de compararlos. Se puede observar como en todas las mediciones para una masa dada colocada en el extremo de la viga se esperaba una deformación teórica ligeramente menor a la obtenida, experimentalmente, con la galga de deformación.

En teoría, la siguiente relación debe cumplirse para la situación mostrada en la figura 3:

$$\gamma = \frac{32PL}{\pi D^3} = E\varepsilon \quad (2)$$

donde :

$\gamma$  es el esfuerzo

P es la fuerza

L es la distancia desde la galga al punto de aplicación de la carga

D es el diámetro de la barra

E es el modulo de elasticidad

$\varepsilon$  es la deformación unitaria

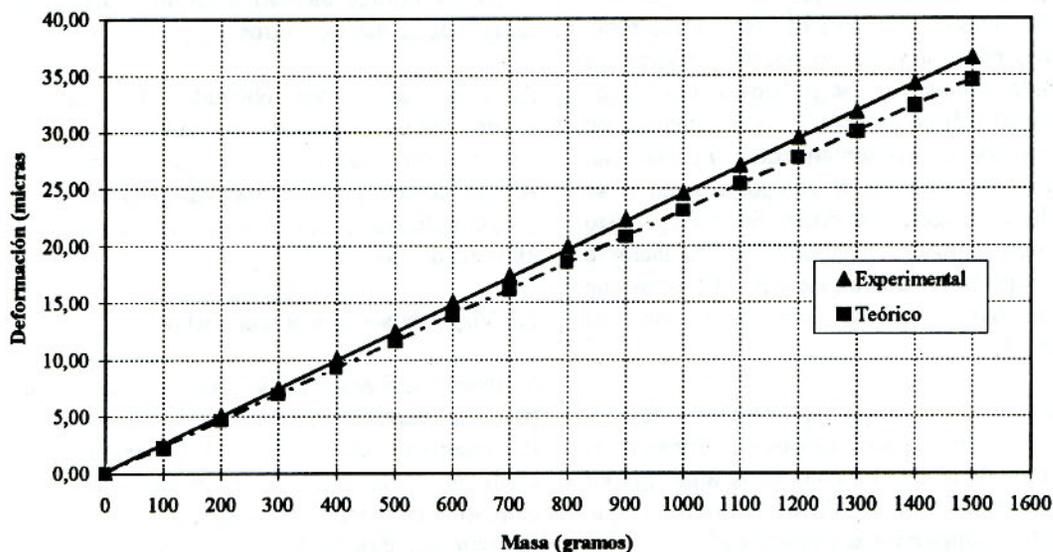


Figura 4. Deformación contra masa en el extremo de la barra

Al utilizar la ecuación (2), y los datos presentados en la tabla 2, obtenemos el gráfico de la figura 5. Este gráfico muestra las curvas

esfuerzo-deformación teórica y experimental y además presenta el porcentaje de error de los datos experimentales.

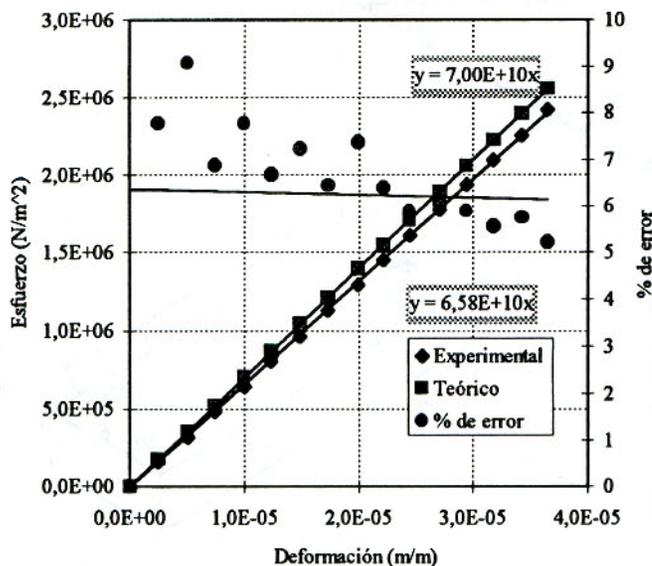


Figura 5. Curvas esfuerzo-deformación teórica y experimental, y porcentaje de error.

Se puede concluir que los resultados experimentales y teóricos se encuentran cercanos entre sí y que se podrían mejorar los resultados obtenidos. Se utilizó un módulo de elasticidad teórico de 70 GPa, sin embargo, no se comprobó experimentalmente. El material, según el experimento, se comporta como si su módulo de elasticidad fuera 66 GPa. Esto brinda un promedio de error del 6,3%, siempre por debajo del resultado esperado. Aspectos que pueden haber creado este error son los siguientes:

**Alineación de la galga:** si la galga estuviera desalineada unos pocos grados con respecto al eje longitudinal de la barra sería algo que no consideramos en los cálculos teóricos y que afecta los resultados experimentales.

El módulo de elasticidad teórico no es en realidad 70 GPa exactos para el aluminio utilizado.

Pequeños errores aleatorios en mediciones de dimensiones, masas, y otros.

A pesar del error obtenido, la relación experimental lineal en la curva esfuerzo-deformación indica que la galga fue instalada adecuadamente y el sistema viga-galga formado podría utilizarse como un sensor de fuerza en el extremo de una viga.

## 2.2 Vigas de Sección Rectangular

Se instaló una galga de deformación, utilizando productos especializados para extensometría, en la superficie de una viga rectangular de aluminio. Se realizó un experimento que consistió en someter esta viga a una carga  $P$  en su extremo, cuando la viga se encontraba en cantilever. Se pretendió someter la viga a esfuerzos mucho mayores que los obtenidos en la sección anterior. Un esquema de esta viga y la galga de deformación utilizada se presenta en la figura 6.

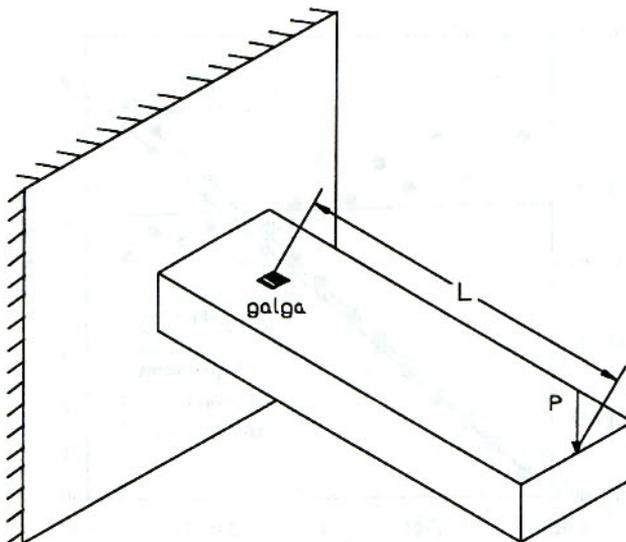


Figura 6. Viga de sección rectangular en voladizo

Los resultados de deformación obtenidos se presentan en la tabla 3. Tales resultados se obtuvieron considerando que la distancia entre

el punto de aplicación de la carga y la galga fue de 15,255 cm; el ancho de la viga 2,530 cm, y el espesor 0,325 cm.

Tabla 3. Cargas y deformaciones en la viga rectangular de aluminio

Masa (gramos)	Def <sub>1</sub>	Def <sub>2</sub>	Def <sub>3</sub>	Promedio
0	0	0	0	0,00E+00
47	26	25	25	2,53E-05
147	78	76	76	7,67E-05
247	127	127	127	1,27E-04
347	183	178	178	1,80E-04
447	234	229	230	2,31E-04
547	275	279	280	2,78E-04
647	326	329	331	3,29E-04

Con la ecuación (3) se determina el esfuerzo teórico en la posición donde se encuentra la galga:

$$\gamma = \frac{6PL}{ab^2} = E\varepsilon \quad (3)$$

donde :

$\gamma$  es el esfuerzo  
P es la fuerza

L es la distancia desde la galga al punto de aplicación de la carga  
a es el ancho de la viga  
b es el espesor de la viga  
E es el módulo de elasticidad  
 $\varepsilon$  es la deformación unitaria

Así, utilizando la ecuación (3) y los datos experimentales de la tabla 3, se obtiene el gráfico de la figura 7.

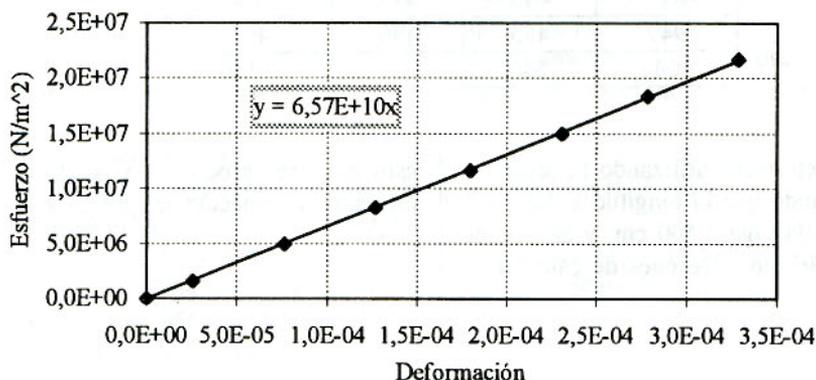


Figura 7. Esfuerzo-deformación para la viga rectangular de aluminio

El resultado obtenido es un módulo de elasticidad de 66 GPa para el aluminio del que está hecha la viga, el cual es cercano al valor teórico esperado de 70 GPa. Ocurre una situación muy similar a la ocurrida con la barra de sección transversal circular que se estudió arriba.

### 2.3 Viga de Sección Rectangular de Acero Estructural

Se llevó a cabo un tercer experimento similar al anterior pero con una viga de acero estructural de sección rectangular. El montaje se realizó como se muestra en la figura 6. A diferencia de los experimentos anteriores, en este experimento se utilizaron productos disponibles en el mercado nacional, tanto para preparar la superficie como para pegar la galga. Los resultados obtenidos al cargar la viga en su extremo libre se presentan en la tabla.

Tabla 4. Cargas y deformaciones en la viga rectangular de acero

Masa (gramos)	Def <sub>1</sub>	Def <sub>2</sub>	Promedio (micras)
0	0	0	0
47	25	26	25.5
147	78	78	78
247	130	131	130.5
347	182	184	183
447	235	237	236
547	287	289	288
647	339	341	340
747	392	392	392
847	445	445	445
947	495	496	495.5
1047	546		546

El esfuerzo se determina utilizando la ecuación (3), y considerando que la longitud  $L$  fue 44,3 cm; el ancho de la viga 2,500 cm; y el espesor de la viga 0,3286 cm. Después de calcular el

esfuerzo, se procedió a graficar la curva esfuerzo-deformación en la figura 8.

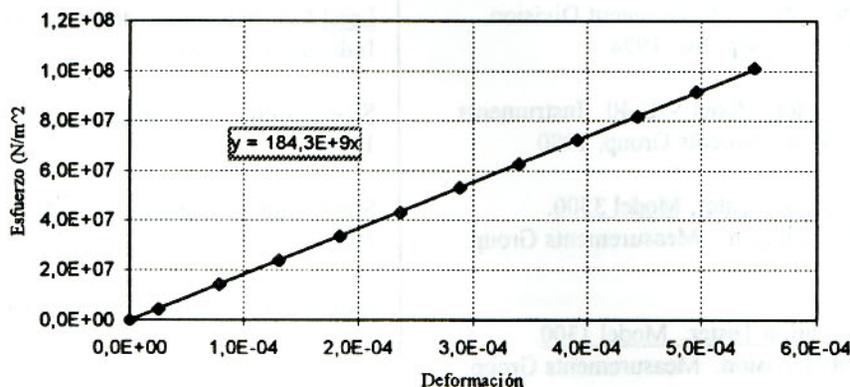


Figura 8. Esfuerzo-deformación para la viga rectangular de acero

Se determinó que el módulo de elasticidad del acero utilizado en el experimento es 184,3 GPa; por lo que, si en teoría se considera ser 200 GPa, entonces el error obtenido en el experimento es de 7,8%. Ocurrió una situación muy similar a los dos ejemplos anteriores con las dos vigas de aluminio.

### 3. CONCLUSIONES

Es importante la respuesta lineal que brindan las galgas de deformación una vez instaladas correctamente, lo cual puede servir para construir celdas de carga, balanzas, o sensores de fuerza, torque o presión. Los gráficos de esfuerzo-deformación obtenidos con las galgas instaladas en la viga circular y en las vigas rectangulares sirven como una curva de calibración, en caso de que se desee utilizar tales vigas como sensores de la fuerza aplicada en su extremo. Se comprobó, con las pruebas realizadas, que las galgas de deformación son idóneas para ser utilizadas en la fabricación de sensores tales como celdas de carga, pues generan una relación lineal bien definida entre el voltaje de salida del puente de *Wheatstone*, donde se encuentran las galgas, y la variable que se desea medir. Esto facilita su calibración y

utilización. Se determinó también que existen errores del orden del 7% en el cálculo del módulo de elasticidad, en los resultados experimentales con galgas de deformación instaladas en vigas en voladizo, al comparar con los resultados esperados en teoría. O sea, que bajo las mismas situaciones de carga, experimentalmente la galga nos indica una mayor deformación que la esperada en teoría.

Se puede concluir que los resultados obtenidos con las galgas de deformación son similares, no importa si se utilizan los productos específicos que venden los comercios de equipo extensométrico o productos equivalentes adquiridos en el mercado nacional.

### 4. BIBLIOGRAFÍA

Avner, Sydney. Introducción a la Metalurgia Física. Segunda Edición. México, McGraw-Hill, 1987

Boletín 309D. Student Manual for Strain Gage Technology. Education Division. Measurement Group, Inc. 199

Catálogo A-110-7. M-Line Strain Gage Accessories. Micro-Measurement Division. Measurement Group, Inc. 1994

Decade Resistor, Model V/E-40. Instruments Division. Measurements Group. 1980

Digital Strain Indicator, Model 3500. Instruments Division. Measurements Group. 1983

Gage Installation Tester, Model 1300. Instruments Division. Measurements Group. 1993

Load Cell Indicator, Model 51309. Slope Indicator Co. 1984

SR-4 Strain Gage Handbook. BLH Electronics. 1980

Strain Gages Accessories. BLH Electronics. 1985

Strain Gages. BLH Electronics. 1985