



**UNIVERSIDAD DEL AZUAY FACULTAD DE CIENCIA Y
TECNOLOGÍA ESCUELA DE INGENIERÍA AUTOMOTRIZ**

**Caracterización del sistema de adquisición de datos para medir esfuerzos mecánicos de
manera experimental en una viga de acero inoxidable en voladizo.**

Trabajo de graduación previo a la obtención de título de:

INGENIERO EN MECÁNICA AUTOMOTRIZ

Nombre de los autores:

FRANCISCO XAVIER CONTRERAS GUILLERMO

JOSÉ SEBASTIÁN SIGUENCIA LOJA

Nombre del director:

Ing. HERNÁN VITERI CERDA Msc

CUENCA – ECUADOR

2024

Dedicatoria:

A Dios, a mis padres y hermana por todo el apoyo y entendimiento que me brindaron.

Agradecimiento

Primeramente, agradecer a Dios por la vida y salud que me brinda para llegar hasta este punto de mi vida. A mis padres por todo su sacrificio y entendimiento que me brindaron a lo largo de mi camino de igual forma a mi hermana y amigos cercanos que me brindaron su apoyo, a los profesores de la UDA que me entregaron las herramientas necesarias para poder ampliar mis conocimientos. También un agradecimiento al Ing. Hernán Viteri director de nuestra tesis por estar siempre pendiente de nuestro progreso.

Francisco Contreras

Dedicatoria:

Dedico este trabajo principalmente a Dios. A mi madre y padre por el apoyo incondicional y sus consejos.

Agradecimiento

A Dios, por haberme dado salud y vida. A mi madre, por el apoyo y consejos que me dio en los momentos difíciles con la frase "Nadie nace sabiendo". A mi padre, por el optimismo que me transmitía en los momentos complicados. A mis hermanos por sus consejos y apoyos.

También un agradecimiento al Ing. Hernán Viteri director de nuestra tesis por estar siempre pendiente de nuestro progreso.

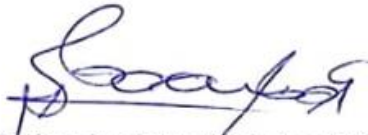
Sebastián Siguencia

Caracterización del sistema de adquisición de datos para medir esfuerzos mecánicos de manera experimental en una viga de acero inoxidable en voladizo.

Resumen

El objetivo del presente estudio es caracterizar el sistema de adquisición de datos para medir esfuerzos mecánicos de manera experimental en una viga de acero inoxidable en voladizo. La investigación que se desarrollo es de tipo experimental, realizado con varias pruebas en laboratorio usando galgas extensiométricas. Inicialmente se obtuvo los esfuerzos de una viga de acero inoxidable en voladizo en una simulación computacional, en el cual se determinó los esfuerzos a flexión y a torque en puntos específicos de la viga, luego se obtuvieron los datos usando el sistema de adquisición con galgas uniaxiales para el análisis de flexión y galgas tipo roseta para el análisis a torsión con diferentes configuraciones del puente de Wheatstone, por último, los resultados obtenidos fueron caracterizados para determinar qué tan preciso es el sistema de adquisición; se obtuvo un error relativo aceptable, se concluyó que las galgas tipo roseta brindan mejores resultados comparados con las uniaxiales, debido a que estas presentan errores relativos más bajos.

Palabras clave: Caracterizar, galgas extensiométricas, voladizo, esfuerzo mecánico, flexión, torsión.



Ing. Robert Rockwood Iglesias M.Sc.
Coordinador de Escuela de Ing. Automotriz



Ing. Hernán Viteri Cerda M.Sc.
Director



Francisco Xavier Contreras Guillermo
Autor



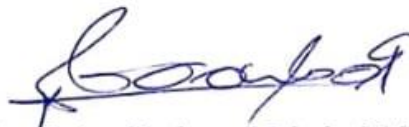
José Sebastián Siguencia Loja
Autor

Characterization of the data acquisition system for experimental measurement of mechanical stresses on a cantilever stainless steel beam.

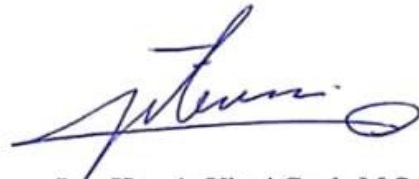
Abstract

The objective of the present study is to characterize the data acquisition system for experimentally measuring mechanical stresses on a cantilevered stainless steel beam. The research conducted is of an experimental nature and was carried out through various laboratory tests using strain gauges. Initially, the stresses on a cantilevered stainless steel beam were obtained through a computational simulation, which determined both bending and torque stresses at specific points on the beam. Subsequently, data was acquired using the acquisition system with uniaxial strain gauges for the analysis of bending and rosette strain gauges for torsional analysis, with different Wheatstone bridge configurations. Finally, the obtained results were characterized to assess the accuracy of the acquisition system; an acceptable relative error was obtained. It was concluded that rosette strain gauges provide better results compared to uniaxial ones, as they exhibit lower relative errors.

Index Terms: Characterize, strain gauges, cantilever, mechanical stress, bending, torsion.



Ing. Robert Rockwood Iglesias M.Sc.
School Director



Ing. Hernán Viteri Cerda M.Sc.
Thesis Director



Francisco Xavier Contreras Guillermo
Author



José Sebastián Sigüencia Loja
Author

Caracterización del sistema de adquisición de datos para medir esfuerzos mecánicos de manera experimental en una viga de acero inoxidable en voladizo.

Hernán Viteri Cerda
Universidad del Azuay
Facultad de Ciencia y Tecnología
Ingeniería en Mecánica Automotriz
Cuenca, Ecuador
hviteri@es.uzuay.edu.ec

Francisco Contreras Guillermo
Universidad del Azuay
Facultad de Ciencia y Tecnología
Ingeniería en Mecánica Automotriz
Cuenca, Ecuador
franprog@es.uazuay.edu.ec

José Sigüencia Loja
Universidad del Azuay
Facultad de Ciencia y Tecnología
Ingeniería en Mecánica Automotriz
Cuenca, Ecuador
joseb@es.uazuay.edu.ec

Resumen—El objetivo del presente estudio es caracterizar el sistema de adquisición de datos para medir esfuerzos mecánicos de manera experimental en una viga de acero inoxidable en voladizo. La investigación que se desarrolló es de tipo experimental, realizado con varias pruebas en laboratorio usando galgas extensiométricas. Inicialmente se obtuvo los esfuerzos de una viga de acero inoxidable en voladizo en una simulación computacional, en el cual se determinó los esfuerzos a flexión y a torque en puntos específicos de la viga, luego se obtuvieron los datos usando el sistema de adquisición con galgas uniaxiales para el análisis de flexión y galgas tipo roseta para el análisis a torsión con diferentes configuraciones del puente de Wheatstone, por último, los resultados obtenidos fueron caracterizados para determinar qué tan preciso es el sistema de adquisición; se obtuvo un error relativo aceptable, se concluyó que las galgas tipo roseta brindan mejores resultados comparados con las uniaxiales, debido a que estas presentan errores relativos más bajos.

Palabras clave— Caracterizar, galgas extensiométricas, voladizo, esfuerzo mecánico, flexión, torsión.

Abstract— The objective of the present study is to characterize the data acquisition system for experimentally measuring mechanical stresses on a cantilevered stainless steel beam. The research conducted is of an experimental nature and was carried out through various laboratory tests using strain gauges. Initially, the stresses on a cantilevered stainless steel beam were obtained through a computational simulation, which determined both bending and torque stresses at specific points on the beam. Subsequently, data was acquired using the acquisition system with uniaxial strain gauges for the analysis of bending and rosette strain gauges for torsional analysis, with different Wheatstone bridge configurations. Finally, the obtained results were characterized to assess the accuracy of the acquisition system; an acceptable relative error was obtained. It was concluded that rosette strain gauges provide better results compared to uniaxial ones, as they exhibit lower relative errors.

Index Terms— Characterize, strain gauges, cantilever, mechanical stress, bending, torsion.

I. INTRODUCCIÓN

La finalidad de la utilización de este sistema de adquisición de datos es encontrar de forma experimental los valores de los esfuerzos a los que está siendo sometido los elementos o componentes mecánicos, ya que su principal función es digitalizar las señales que son comunicadas desde los sensores al computador. [1] Las galgas extensiométricas son sensores basados en el efecto piezorresistivo, esto quiere decir que su resistencia varía en función del esfuerzo o estrés mecánico que los deforma. Para conocer el cambio de voltaje en función de la variación de resistencia se utiliza el puente de Wheatstone, que para el caso de las galgas uniaxiales se usan dos tipos de configuración del puente de Wheatstone; en la figura 1 se aprecia una configuración que es conocida como cuarto de puente en la cual se usa solo una galga.

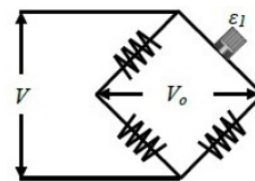


Figura 1: Configuración a cuarto de puente. [2]

En la siguiente figura 2 se tiene una configuración a medio puente donde emplea dos galgas en paralelo.

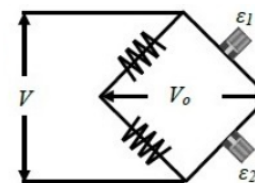


Figura 2: Configuración a medio puente. [2]

Para la roseta se utiliza la configuración a un cuarto de puente. Las gagas trabajan dentro de la zona de deformación elástica como se puede ver en la figura 3.

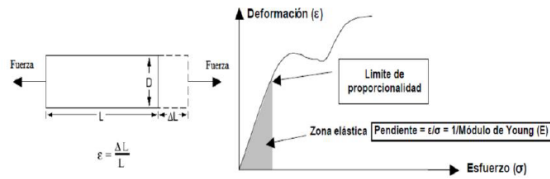
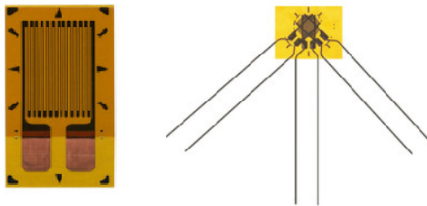


Figura 3: Área de funcionamiento de la galga extensiométrica. [3]

Existen diferentes tipos de galgas extensiométricas como se puede ver en la siguiente figura 4.



A) Galga uniaxial. B) Galga tipo roseta a 45°.

Figura 4: Tipos de galgas extensiométricas. [4]

La selección del tipo de sensor depende del caso del experimento, por ejemplo, en el caso a flexión, se conoce cuál es la dirección principal de deformación, por lo tanto para este caso se utiliza galgas uniaxiales, ya que estas están diseñadas para medir esfuerzos en una sola dirección y para el caso de torque se usan galgas tipos roseta, ya que estas nos ayudan a determinar el estado plano de tensión. Conociendo el valor de los esfuerzos que experimentan los componentes se puede determinar cuánto pueden soportar sin que el material llegue a fallar. Con la caracterización de este sistema de adquisición sabremos que tan fiable es la información que nos brinda, es decir tomando datos preliminares, procesándolos y analizando los datos que tenemos a partir del sistema; se puede comparar con datos obtenidos en simulación o de forma analítica. Con esto se obtendrá el error relativo, y a medida que sigamos ajustando la metodología para llegar a obtener el error relativo aproximado a cero llegaremos a caracterizar este sistema de adquisición.

II. MÉTODO

Se analizarán los esfuerzos a 3 mm y 50 mm del empostramiento en dos casos: con la carga en Q1 (Flexión) y Q2 (Torque) como se aprecia en la figura 5.

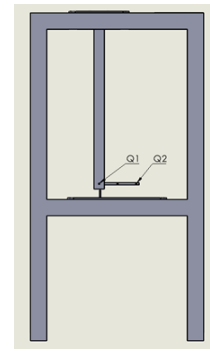


Figura 5: Esquema de la maqueta en la que se realizan las pruebas a flexión y torque.

II-A. Método analítico para comparar la viga en flexión.

Se realiza un cálculo analítico de la deformación máxima y el esfuerzo de Von Mises en una viga cuadrada de acero inoxidable con modulo de elasticidad de 193 GPa, cuya sección tiene 25.4 mm de largo, espesor de 1.5 mm y longitud de 430 mm. [5]

Para el cálculo de la deformación máxima se utilizó la fórmula 1.

$$y_{max} = \frac{-PL^3}{3EI} \quad (1)$$

Donde:

y_{max} = Deformación máxima. (m)

P = Carga. (N)

L = Longitud de la viga. (m)

E = Modulo de elasticidad. (Pa)

I = Momento de inercia de la sección. (m^4)

El esfuerzo de flexión se lo calcula usando la ecuación 2.

$$\sigma = \frac{Mc}{I} \quad (2)$$

Donde:

σ = Esfuerzo normal. (Pa)

M = Momento. (Nm)

c = Distancia del eje neutro a la fibra de análisis. (m)

I = Momento de inercia de la sección. (m^4)

Para el esfuerzo cortante se aplica la ecuación 3.

$$\tau = \frac{Tc}{J} \quad (3)$$

Donde:

τ = Esfuerzo cortante. (Pa)

T = Torque. (Nm)

c = Distancia del eje neutro a la fibra de análisis. (m)

J = Momento polar de inercia. (m^4)

Para calcular la deflexión máxima en el punto de aplicación de la carga P cuando se aplica torque a la viga se emplea el teorema de Castigliano [6].

$$\delta = \int_0^L \frac{M}{EI} \frac{\partial M}{\partial P} dx \quad (4)$$

Donde:

δ = Deflexión en el punto de aplicación de la carga P. (N)

M = Ecuación del momento para la viga. (Nm)

E = Modulo de Young del material de la viga. (Pa)

I = Momento de inercia de la sección de la viga. (m⁴)

L = Longitud de la viga. (m)

$\frac{\partial M}{\partial P}$ = Derivada de la ecuacion del momento con respecto a P.

Aplicando los datos de la viga en el Teorema de Castigliano de la ecuación 4, se deduce la siguiente ecuación que nos permite ver cuál es la deformación en el punto de aplicación de la carga P.

$$\delta_j = \frac{P}{3} \left[\frac{x^3}{EI_b} + \frac{3zx^2}{JG} + \frac{z^3}{EI_v} \right] \quad (5)$$

Donde:

P = Carga. (N)

x = Longitud de la barra donde se aplica la carga. (m)

E = Modulo de Young del material de la viga. (Pa)

I_b = Momento de inercia de la sección de la barra. (m⁴)

z = Longitud de la viga. (m)

J = Momento polar de la viga. (m⁴)

G = Modulo de cizalladura de la viga. (Pa)

I_v = Inercia de la viga. (m⁴)

Teniendo el esfuerzo de flexión “σ” calculado anteriormente con la ecuación 2, siendo este un esfuerzo normal se lo puede sustituir para los siguientes cálculos por “σ_y”. El esfuerzo torsional “τ” calculado con la ecuación 3 se lo reemplaza por “τ_{xy}”. El esfuerzo “σ_x” no tiene valor por lo que sera igual a cero. El esfuerzo de Von Mises se lo calcula con la siguiente ecuación 6.

$$\sigma_{VM} = \sqrt{(\sigma_x)^2 + (\sigma_y)^2 - (\sigma_x \sigma_y) + 3(\tau_{xy})^2} \quad (6)$$

Donde:

σ_{VM} = Esfuerzo de Von Mises. (Pa)

σ_x = Esfuerzo normal en X. (Pa)

σ_y = Esfuerzo normal en Y. (Pa)

τ_{xy} = Esfuerzo cortante. (Pa)

Los esfuerzos principales se los obtendrá de la siguiente forma ecuación 7.

$$\sigma_1; \sigma_2 = \frac{\sigma_x - \sigma_y}{2} \pm \sqrt{\left(\frac{\sigma_x - \sigma_y}{2}\right)^2 + \tau_{xy}^2} \quad (7)$$

Donde:

σ_1 = Esfuerzo principal primario. (Pa)

σ_2 = Esfuerzo principal secundario. (Pa)

σ_x = Esfuerzo normal en el eje x. (Pa)

σ_y = Esfuerzo normal en el eje y. (Pa)

τ_{xy} = Esfuerzo cortante. (Pa)

II-B. Método de simulación.

La viga también fue analizada con una simulación computacional, en la tabla I se puede apreciar los parámetros del mallado de la viga para la simulación.

Tabla I: Parámetros del mallado.

Tipo de elemento.	Triangular
Tamaño del elemento.	2 mm
Refinado de elementos	1mm
Skew	14 (0 %)
Número de elementos 2D	60628
Número de elementos 3D	117855

En la figura 6 se puede ver la calidad del mallado 2D, cabe recalcar que esta malla solo sirvió de base para a partir de esta generar una malla con elementos 3D.

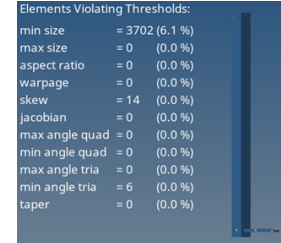


Figura 6: Calidad del mallado

Los parámetros de la malla de la simulación con toda la estructura se muestra en la tabla II. Esta simulación se la elaboró porque la estructura no está completamente fija es decir que también absorbe parte de los esfuerzos, esta simulación será comparada con los datos adquiridos experimentalmente.

Tabla II: Parámetros del mallado.

Tipo de elemento.	Triangular
Tamaño del elemento.	2 mm
Refinado de elementos	1mm
Skew	31 (0 %)
Número de elementos 2D	373588
Número de elementos 3D	556538

La calidad del mallado de la simulación que contempla toda su estructura se lo puede apreciar en la figura 7.

Elements Violating Thresholds:		Model Info
min size	= 8 (0.0 %)	
max size	= 92780 (24.8 %)	
aspect ratio	= 8 (0.0 %)	
warpage	= 0 (0.0 %)	
skew	= 31 (0.0 %)	
jacobian	= 0 (0.0 %)	
max angle quad	= 0 (0.0 %)	
min angle quad	= 0 (0.0 %)	
max angle tria	= 0 (0.0 %)	
min angle tria	= 29 (0.0 %)	
taper	= 0 (0.0 %)	

Figura 7: Calidad del mallado

II-C. Método experimental para obtener esfuerzos en la viga sometida a flexión.

Para poder medir los esfuerzos se colocan galgas extensométricas uniaxiales, a 3 mm y 5 cm del empotramiento representada en la figura 8.

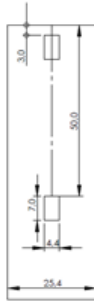


Figura 8: Ubicación de las galgas

Una vez identificado el lugar donde se localiza la galga, se lija el material con lijas de la más gruesa grano 400 hasta la más fina grano 1200, esto con el fin de que la galga se adhiera correctamente al material. Luego se coloca la galga en un pedazo de cinta transparente, para poder centrarla en la viga, se coloca una gota de pegamento de cianoacrilato en el material y se presiona la galga por un minuto, luego se retira la cinta y la galga queda adherida a la viga. [7]

Se debe utilizar guantes para manipular las galgas para evitar que se contamine la zona de pegado como se observa en la figura 9.



Figura 9: Pegado de la galga en la viga.

También se colocaron unos pedazos de baquelita “PADS” por debajo de los sensores, esto con el fin de evitar que la tensión mecánica llegue a romper los cables del sensor ya que estos son muy finos, también a estos se sueldan cables multiplexados para transferir la información del sensor a la tarjeta de adquisición como se muestra en la figura 10.

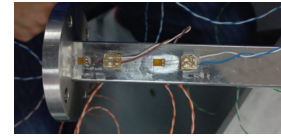


Figura 10: Unión de los sensores a los cables multiplexados.

Previo a la obtención de datos se denominó a las caras; lado A van a estar a compresión (1A - 3 mm; 2A - 50 mm) y lado B a tensión (1B - 3 mm; 2B - 50 mm); esto para identificar como actúan los esfuerzos en la viga y especificar la entrada de los cables correctos al sistema de adquisición.

Se procede con la calibración del equipo sin pesos, continuamos con la puesta a cero del sistema, se revisa que el reloj palpador marque cero. Realizamos la toma de datos sin peso por un minuto, se guarda los datos, se coloca el peso C en la maqueta, se toma los datos por un minuto, se guarda, este método se repite con todos los pesos especificados; en la tabla III.

Tabla III: Pesos usados en la adquisición de datos experimentales.

Nomenclatura.	Peso [Kg]
C.	0,9903
D.	0,9949
E.	0,9945
F.	0,9882
G.	0,9908
TOTAL.	4,9587

La toma de datos se la realiza por un minuto para cada peso, y también se tomó una muestra sin peso para poder enserar el sistema. Los datos se los procesa en Excel y se encuentran los promedios en cada medición; en la tabla IV se puede observar un cuadro de resumen con los datos obtenidos en la prueba.

Tabla IV: Cuadro de resumen de los datos experimentales.

Cuadro de puente (ALTA VELOCIDAD)						
#	Peso (ID)	Medida en el reloj (mm)	Medidas en la galga (mV)			Observaciones
			Galga 45°	Galga 90°	Galga 135°	
1	C	0,1	0,004880923	0,01401531	0,01206685	voltaje en milivoltios
2	CD	0,295	0,009094601	0,028748	0,02174997	
3	CDE	0,48	0,013547405	0,03830949	0,03130917	
4	CDEF	0,66	0,01759877	0,05014267	0,04090549	
5	CDEFG	0,85	0,02137816	0,06257274	0,0493748	
6						
encendido			-0,00011724	0,00449254	0,00330955	primera medida con cero peso

A continuación, estos valores promedios se los transforma de milivoltios a voltios y luego, se calculará la deformación unitaria a partir de la ecuación 8 para determinar cuál es la deformación unitaria en la sección de la galga. [8]

$$\varepsilon = \frac{4V}{EK} \quad (8)$$

Donde:

ε = Deformación unitaria.

V = Voltaje promedio. (V)

E = Voltaje de excitación. (V)

K = Constante de la galga.

Cuando se tiene una configuración a medio puente se debe usar la siguiente ecuación:

$$\varepsilon = 0,5 \frac{4V}{EK} \quad (9)$$

Después se encontrará el esfuerzo aplicando la siguiente formula.

$$\sigma = \frac{E}{(1 - \mu)} \varepsilon \quad (10)$$

Donde:

σ = Esfuerzo. (Pa)

E = Modulo de elasticidad del material. (Pa)

μ = Coeficiente de Poisson del material.

ε = Deformación unitaria.

II-D. Método experimental para obtener esfuerzos en una viga sometida a torque.

Se coloca una roseta a 45° a 3 mm del empotramiento, para esto se preparó la zona igual que en el caso anterior como se aprecia en la figura 11.



Figura 11: Pegado de la roseta.

El procedimiento para la obtención de datos fue el mismo que se realizó con las galgas uniaxiales y se lleno de igual manera el cuadro de resumen con los promedios de los voltajes adquiridos por la tarjeta de adquisición como se aprecia en anexo 1. Para el caso de la adquisición de datos se utiliza una roseta a 45°, como se aprecia en la figura 12.

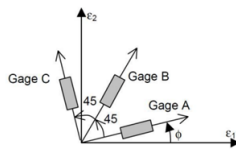


Figura 12: Configuración geométrica de una galga tipo roseta a 45°. [9]

Según Micro-Measurements [10] las ecuaciones de las deformaciones principales en función de las deformaciones unitarias leídas por cada galga viene dadas por la ecuación 11.

$$\varepsilon_1, \varepsilon_2 = \frac{\varepsilon_A + \varepsilon_C}{2} \pm \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{(\varepsilon_A - \varepsilon_B)^2 + (\varepsilon_B - \varepsilon_C)^2} \quad (11)$$

Donde:

$\varepsilon_1, \varepsilon_2$ = Deformaciones principales.

ε_A = Deformación unitaria medida por la galga A.

ε_B = Deformación unitaria medida por la galga B.

ε_C = Deformación unitaria medida por la galga C.

Teniendo estas deformaciones principales podemos determinar los esfuerzos principales usando la formula 12.

$$\sigma_1 = \frac{E}{1 - \mu^2} (\varepsilon_1 + \mu \varepsilon_2) ; \sigma_2 = \frac{E}{1 - \mu^2} (\varepsilon_2 + \mu \varepsilon_1) \quad (12)$$

Con la siguiente ecuación 13 se determina el esfuerzo de Von Mises en función de los esfuerzos principales; cabe recalcar que para este caso σ_3 no tendrá valor.

$$\sigma_{VM} = \sqrt{\frac{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2}{2}} \quad (13)$$

II-E. Método comparativo.

Teniendo los valores de los esfuerzos y deformaciones máximas se comparan estos valores para obtener una validación de la simulación realizada. Santo y Lecumberry [11] afirma lo siguiente:

$$\begin{aligned} e\% &< 1\% \text{ muy bueno.} \\ e\% &\iff 5\% - 10\% \text{ aceptable.} \\ e\% &> 10\% \text{ poco confiable.} \end{aligned}$$

Esta comparación se consigue obteniendo el error relativo porcentual aplicando la siguiente formula.

$$\text{Error } \% = 100 * \frac{(\text{Valor real} - \text{Valor medido})}{\text{Valor real}} \quad (14)$$

En el anexo 2 se presentan un cuadro de datos relevantes para la conseguir los resultados.

III. RESULTADOS.

III-A. Cálculos de flexión analíticos y simulación (deformación y esfuerzos).

Se aplica la formula (1) con los datos mencionados en la tabla 6 y se obtiene el valor de 0.407 mm de deformación máxima en el punto donde se aplica la fuerza. En la simulación que se observa en la figura 13 se obtiene una deformación máxima de 0.422 mm en el mismo punto.

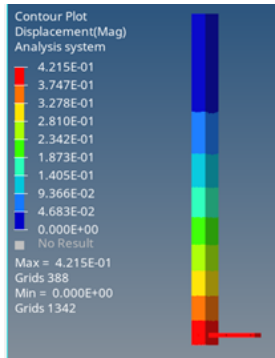


Figura 13: Simulación de la deformación máxima a flexión.

Para calcular los esfuerzos a flexión a 3 mm del empotramiento como se aprecia en la figura 14 se aplica la ecuación (2), se obtuvo un valor calculado de 18.10 MPa y en la simulación un valor de 18.22 MPa.

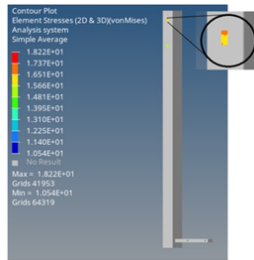


Figura 14: Simulación del esfuerzo máximo a flexión.

III-B. Obtención de datos experimentales a flexión (deformación y esfuerzos).

Los datos experimentales de deformación, es decir la lectura del reloj, con todos los pesos colocados se obtuvo un valor de 0.69 mm; se realiza una nueva simulación ya que se pudo observar que la estructura que sujeta a la probeta también absorbe esfuerzo y se obtuvo una deformación máxima de 0.63 mm como se puede ver en la figura 15.

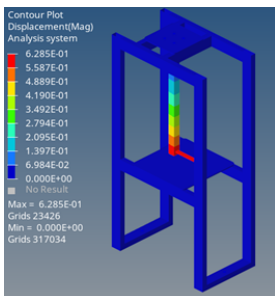


Figura 15: Simulación de la deformación máxima a flexión.

Se toma el valor medio de voltaje (0.059 mV) obtenido cuando se aplica una carga de 4.96 kg como se puede ver en la siguiente figura 16.

Cuarto de puente (ALTA VELOCIDAD)						
#	Pesa (ID)	Medida en el reloj (mm)	Medidas en la galga (mV)			
			Galga 1A	Galga 2A	Galga 1B	Galga 2B
5	CDEFG	0,69	0,0591	-0,0361	0,0588	-0,0403

Figura 16: Voltaje promedio.

Se lo introduce en la ecuación (9) y se obtiene una deformación unitaria de $4,50 \times 10^{-5}$, usando la formula (11) se obtiene un esfuerzo de 12.59 MPa. También se adquirieron datos en una configuración a medio puente de este modo se hace una lectura de dos galgas en un solo puerto; es decir la galga 1A con la 1B, ambas ubicadas a 3 mm y la galga 2A con la 2B que están ubicadas a 5 cm; también se toma el valor promedio de voltaje con todos los pesos que es de 0.102 mV como se lo puede ver en el Anexo 3. Este valor se lo aplica en la ecuación (10) y se obtiene una deformación unitaria de $3,88 \times 10^{-5}$ con este valor aplicamos la ecuación (11) y se obtiene el esfuerzo de 10.86 MPa. En la simulación se obtuvo un esfuerzo máximo de Von Mises de 16.12 MPa y un mínimo de 4.76 MPa que se muestra en la figura 17.

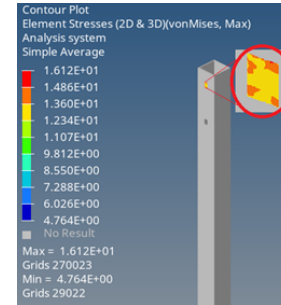


Figura 17: Resultados de la simulación de esfuerzo de Von Mises.

Con estos valores máximo y mínimo se obtuvo un valor medio de esfuerzo de Von Mises de 10.44 MPa.

III-C. Resultados de los cálculos analíticos (combinados).

Aplicando la ecuación (5) con los datos de la viga se obtuvo una deformación máxima de 0.557 mm. El esfuerzo normal aplicando la formula (2) es de 18.08 MPa y el esfuerzo de torsión que se obtuvo aplicando la ecuación (3) es de 1.94 MPa, con estos esfuerzos normal y cortante se obtiene el esfuerzo de Von Mises aplicando la formula (6) este esfuerzo es de 18.40 MPa; también se calcularon los esfuerzos principales aplicando la ecuación (7), los esfuerzos obtenidos son $\sigma_1=13.96$ MPa; $\sigma_2=4.12$ MPa.

III-D. Resultados de la Simulación (combinados).

La deformación máxima simulada fue de 0.564 mm en el punto de aplicación de la carga como se puede ver en la imagen 18.

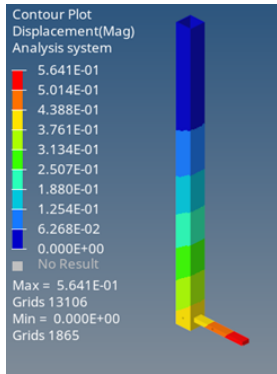


Figura 18: Resultado de la deflexión en la viga sometida a torque.

En la figura 19 se muestra la simulación de la viga sin considerar la estructura; se tiene un esfuerzo máximo de 16.90 MPa.

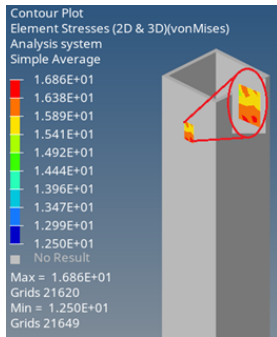


Figura 19: Resultado del esfuerzo en la viga sometida a torque.

El esfuerzo máximo de Von Mises en la simulación considerando toda la estructura es de 15.6 MPa y un mínimo de 4.61 MPa como se puede ver en la figura 20. Sacando un promedio entre estos valores se obtiene un esfuerzo de 10.13 MPa

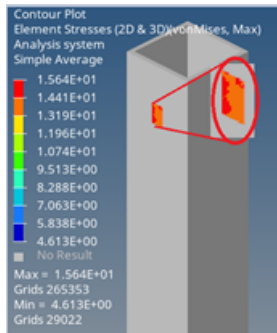


Figura 20: Resultado del esfuerzo de Von Mises con esfuerzos combinados considerando toda la estructura.

La deformación máxima obtenida en la simulación es de 0.77 mm en el punto donde se aplica la fuerza se muestra en la figura 21.

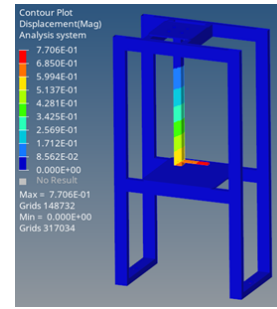


Figura 21: Deformación máxima considerando toda la estructura.

III-E. Resultados del experimento con la viga sometida a torque.

La deformación máxima medida en el punto donde se aplica la fuerza por el reloj comparador fue de 0.85 mm como se muestra en el anexo 1. El voltaje promedio a 45°, 90° y 135° con todos los pesos fue de 0.021 mV, 0.063 mV y 0.050 mV respectivamente, estos valores se los puede observar en el anexo 1. Con estos valores promedios de voltaje se los pasa de milivoltios a voltios y se calcula la deformación unitaria aplicando la formula (9) se obtiene una deformación unitaria de $1,63e^{-5}$ a 45°, $4,76e^{-5}$ a 90° y $3,81e^{-5}$ a 135°; aplicando la ecuación (12) se obtiene una deformación unitaria principal máxima de $5,04e^{-5}$ y un mínima de $3,98e^{-6}$, usando la ecuación (13) se obtiene esfuerzo principal máximo 11.02 MPa y mínimo de 4.18 MPa, empleando la ecuación (14) se consiguió el esfuerzo de Von Mises de 9.64 MPa.

III-F. Resultados de los errores relativos porcentuales.

Los resultados obtenidos a flexión de los cálculos analíticos y la simulación de la viga sin contemplar la estructura, se muestran en la tabla V.

Tabla V: Resultados analíticos y de simulación a flexión.

	Analítico	Simulación
Esfuerzo de Von Mises. (MPa)	18,10	18,22
Deformación máxima. (mm)	0,407	0,422

A continuación en la tabla VI, se observan los resultados experimentales y los resultados de la simulación de la viga con su estructura.

Tabla VI: Resultados de la simulación y datos experimental a flexión.

	Simulación	Experimentación	
		Cuarto	Medio
Esfuerzo de Von Mises (MPa)	10,44	12,59	10,86
Deformación máxima (mm)	0,63	0,69	

En la tabla VII se presentan los resultados analíticos y de la simulación de la viga en el caso de torsión.

Tabla VII: Resultados analíticos y de la simulación a torsión.

	Analítico	Simulación
Esfuerzo de Von Mises. (MPa)	18,40	16,90
Deformación máxima. (mm)	0,557	0,564

En la tabla VIII se presentan los resultados de la simulación de la viga con su estructura y los resultados experimentales a torsión.

Tabla VIII: Resultados de la simulación con su estructura y experimental a torsión.

	Simulación	Experimentación
Esfuerzo de Von Mises. (MPa)	10,13	9,64
Deformación máxima. (mm)	0,77	0,85

También se realizó el cálculo analítico de los esfuerzos principales para poderlos comparar con los resultados experimentales, esto se los puede observar en la siguiente tabla IX.

Tabla IX: Resultados de los esfuerzos principales.

	Analítico	Experimentación
Esfuerzos principales (MPa)	$\sigma_1 = 13,96$ $\sigma_2 = 4,12$	$\sigma_1 = 11,02$ $\sigma_2 = 4,18$

Ahora encontramos los valores de error relativo porcentual, primero para el caso de flexión. Se comparará primero los valores analíticos con la simulación solo de la viga como se puede ver en la tabla X.

Tabla X: Resultados de errores relativos porcentuales comparado analítico con la simulación a flexión.

	Analítico	Simulación	Error
Esfuerzo de Von Mises. (MPa)	18,10	18,22	1 %
Deformación máxima. (mm)	0,407	0,422	4 %

En el anexo 4 se observa la comparación de los resultados a flexión de los datos experimentales con la simulación que contempla toda la estructura.

A continuación se analizan los errores relativos para el caso de esfuerzos combinados.

En la siguiente tabla XI se presentan los errores relativos para el caso de torsión, comparando los resultados analíticos con la simulación de la viga sin considerar la estructura.

Tabla XI: Resultado de error relativo porcentual comparado lo analítico con la simulación a torsión.

	Analítico	Simulación	Error
Esfuerzo de Von Mises. (MPa)	18,40	16,90	9 %
Deformación máxima. (mm)	0,557	0,564	1 %

Se calcula los errores relativos para los esfuerzos y deformaciones obtenidas experimentalmente y con la simulación de la viga considerando la estructura, estos resultados se puede ver en la tabla XII.

Tabla XII: Resultados de errores relativos porcentuales comparado lo experimental con lo simulado a torsión.

	Simulación	Experimental	Error
Esfuerzo de Von Mises. (MPa)	10,13	9,64	5 %
Deformación máxima. (mm)	0,77	0,85	9 %

IV. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

- Tomando en cuenta la comparativa en el caso de la prueba a flexión los valores analíticos con los valores simulados están correctos; pero estos valores son incomparables con los datos obtenidos experimentalmente, esto se debe a que la estructura que sujeta a la viga no es completamente rígida, es decir, que la estructura también absorbe parte de los esfuerzos. Por esto se simuló un segundo diseño que contempla también la estructura; estos valores si son similares a los resultados obtenidos experimentalmente.
- Los resultados de la simulación no se tomó directamente el esfuerzo máximo, sino que se obtuvo un esfuerzo promedio esto con el fin de obtener un valor aproximado en toda la superficie donde actúa la galga.
- Las deformaciones máximas simuladas considerando la estructura completa y la deformación obtenida por el reloj, este se lo alinee con la ubicación donde se aplica la fuerza con el fin de obtener la deformación máxima, comparando estos valores están en un rango aceptable.
- Con respecto a los esfuerzos obtenidos con la configuración de medio puente, son más exactos que los resultados a cuarto de puente por lo que se recomendaría utilizar esta configuración.
- En cuanto a la roseta a 45°, las lecturas de este sensor son precisas, lo que permite la obtención de los esfuerzos de Von Mises, los cuales son similares a los obtenidos por simulación.
- Como recomendación, en el pegado de la galga, se aplique la mínima cantidad de pegamento, ya que al momento de hacer presión para que se adhiera al material el pegamento se desparrame y esto provoca que los cables que llevan la señal tengan contacto con la superficie del material, esto provoca que el sistema de adquisición tenga valores atípicos en su lectura.
- En cuanto a la simulación se recomienda que se consideren todos los detalles que se tengan en la práctica; aunque estos resultados obtenidos en la simulación puedan llegar a ser aproximados a la realidad como se pudo apreciar en este artículo, no se puede tomar estos valores como completamente ciertos ya que en la práctica hay factores externos como: errores humanos, una temperatura no controlada, degradación de materiales, etc.
- Se lograron obtener valores de esfuerzos aceptables tanto experimentalmente como en la simulación.

REFERENCIAS

- [1] "Sistemas, dispositivos y software de adquisición de Datos (DAQ)," 8 2023. [Online]. Available: <https://www.ni.com/es/shop/data-acquisition.html>
- [2] G. Esquer Aceves, "Determinación de la sensibilidad y efectos de agentes externos en galgas extensométricas," 6 2016. [Online]. Available: <http://tesis.ipn.mx/handle/123456789/17813>
- [3] F. G. Muñoz Arévalo, "Validación de metodologías empleadas en simulaciones CAE utilizadas para el desarrollo del prototipo SHELL ECO-MARATHON de la Universidad del Azuay," 2020. [Online]. Available: <http://dspace.uazuay.edu.ec/handle/datos/9710>
- [4] "PCA | Micro-Measurements." [Online]. Available: <https://micro-measurements.com/pca/detail/060wr>

-
- [5] irestal Group. [Online]. Available: <http://data.irestal.com/files/files/2012030204152933979.pdf>
- [6] F. Beer, E. Johnston, and H. Castell, *Mecánica de materiales*. McGraw-Hill, 1993. [Online]. Available: <https://books.google.com.ec/books?id=N6dVAAAACAAJ>
- [7] Jose-Luis-Lopez, “Galgas extensiométricas,” *dokumen.tips*, 5 2018. [Online]. Available: <https://dokumen.tips/documents/galgas-extensiométricas-55a0bcfad5212.html>
- [8] L. Berrocal, *Elasticidad*. McGraw-Hill Interamericana de España S.L., 1998. [Online]. Available: <https://books.google.com.ec/books?id=iPSxOwAACAAJ>
- [9] J. M. Coca, A. Diaz, R. Castañeda, and A. A. rey, “Errores en las mediciones de deformaciones con rosetas,” Jan 2020. [Online]. Available: <https://cimav.repositorioinstitucional.mx/jspui/handle/1004/2513>
- [10] M. Measurements, *Strain Gage Rosettes: Selection, Application and Data Reduction*. Vishay Micro Measurements, 2017. [Online]. Available: https://intertechnology.com/Vishay/pdfs/TechNotes_TechTips/TN-515.pdf
- [11] M. Santo, G. Lecumberry, F. Ortiz, E. Moschetti, and S. Peparelli, “El proceso de medición: análisis y comunicación de datos experimentales,” *Río Cuarto: Universidad Nacional de Río Cuarto*, 2005.

Anexos

Anexo 1. Cuadro de resumen de datos adquiridos por la roseta.

Cuarto de puente (ALTA VELOCIDAD)						
#	Pesa (ID)	Medida en el reloj (mm)	Medidas en la galga (mV)			Observaciones
			Galga 45°	Galga 90°	Galga 135°	
1	C	0,1	0,004880923	0,014015307	0,012066849	voltaje en milivoltios
2	CD	0,295	0,009094601	0,028748	0,021749971	
3	CDE	0,48	0,013547405	0,038309495	0,031309172	
4	CDEF	0,66	0,01759877	0,050142665	0,040905494	
5	CDEFG	0,85	0,02137816	0,06257274	0,049974797	
6						
encerado			-0,000117241	0,004492538	0,003309552	primera medida con cero peso

Anexo 2. Datos relevantes.

Datos	Abreviatura	Valor	Unidades
<i>Carga.</i>	<i>P</i>	4.96	Kg
<i>Longitud de la viga.</i>	<i>L</i>	0.407	m
<i>Modulo de elasticidad.</i>	<i>E</i>	193	GPa
<i>Inercia.</i>	<i>I</i>	1.39×10^{-8}	m^4
<i>Momento.</i>	<i>M</i>	19.80	Nm
<i>Distancia del eje neutro a la fibra más lejana.</i>	<i>c</i>	0.0127	m
Voltaje de excitación	E	2.5	V
Constante de la galga	K	2.1	-
Coefficiente de Poisson del material.	μ	0.31	-

Anexo 3. Cuadro de resumen de los promedios de voltaje a flexión.

Medio puente (ALTA VELOCIDAD)					
#	Pesa (ID)	Medida en el reloj (mm)	Medidas en las galgas (mV)		Observaciones
			Galga 1A_1B	Galga 2A_2B	
1	C	0,14	0,021205268	0,022377391	
2	CD	0,28	0,042432306	0,043529464	
3	CDE	0,41	0,058858457	0,062297938	
4	CDEF	0,59	0,081193658	0,082516668	
5	CDEFG	0,69	0,101941436	0,10255679	
encerado			-0,002503919	-0,000995722	primera medida con cero peso

Anexo 4. Error relativo porcentual comparando los datos experimentales con los simulados a flexión.

	Simulación de la viga con la estructura.	Experimentación		Error relativo (%)
		Cuarto de puente	Medio puente	
Esfuerzo de Von Mises. (MPa)	10.44	12.59		17%
		10.86		4%
Deformación máxima. (mm)	0.63	0.69		9%