

El Tecnológico de Monterrey Campus Chihuahua y el "Decision Sciences Institute" otorgan el presente diploma a:

# MSC RUBÉN CASTAÑEDA BALDERAS

*Por haber participado en el Noveno Congreso Internacional de Investigación Científica Multidisciplinaria como expositor de la ponencia:*

## ERRORES EN LAS MEDICIONES DE DEFORMACIONES CON ROSETAS

**Autores participantes en el congreso:**

JUAN MANUEL COCA GONZÁLEZ, ALBERTO DÍAZ DÍAZ, RUBÉN CASTAÑEDA BALDERAS,  
ALFREDO ALÁN REY CALDERÓN

Chihuahua, Chih. a 17 de noviembre del 2017



**M.C.P. Elias Solis Rivera**  
Director de Investigación,  
Inovación y Desarrollo Tecnológico



**M.A. Maria Cristina Torres Espinosa**  
Coordinadora del Congreso ICM

# Errores en las mediciones de deformaciones con rosetas

**Juan Manuel Coca González**

*Universidad Politécnica Metropolitana de Hidalgo*  
juanmanuelcocag@gmail.com

**Dr. Alberto Díaz Díaz**

*Departamento de Metalurgia e Integridad Estructural*  
*Centro de Investigación en Materiales Avanzados S.C.*  
alberto.diaz@cimav.edu.mx

**M.S.C. Rubén Castañeda Balderas**

*Departamento de Metalurgia e Integridad Estructural*  
*Centro de Investigación en Materiales Avanzados S.C.*  
ruben.castaneda@cimav.edu.mx

**Alfredo Alán Rey Calderón**

*Centro de Investigación en Materiales Avanzados S.C.*  
alfredo.rey@cimav.edu.mx

**Temática general:** Materiales

## Resumen

Las galgas extensiométricas son instrumentos que permiten medir con buena precisión las deformaciones en los materiales sometidos a cargas mecánicas. El presente es un trabajo de experimentación e investigación enfocado a evidenciar discrepancias en los resultados que arrojan las rosetas de deformación con respecto a las galgas de tipo uniaxial, las cuales son consideradas como referencia en pruebas de tensión uniaxial. También se hace un análisis de las posibles causas de estas discrepancias.

**Palabras clave:** Galgas extensiométricas, deformación, esfuerzo, discrepancias.

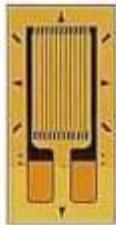
## Abstract

The strain gauges are instruments that allow to measure with good precision the strain in the materials subjected to mechanical loads. The present work is an experiment and research focused on showing discrepancies in the results of the deformation rosettes with respect to uniaxial type gages, which are considered as a reference in tests of uniaxial tension. An analysis is also made of the possible causes of these discrepancies.

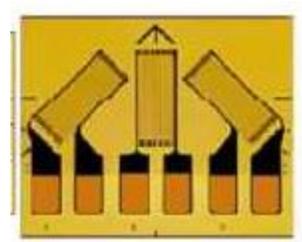
**Keywords:** Strain gauges, strain, stress, discrepancies.

## Introducción

Existen varias pruebas y experimentos que sirven como base para poder predecir el comportamiento de materiales en diferentes condiciones de operación. Estas pruebas requieren de diversos dispositivos para obtener mejores resultados. Uno de estos dispositivos son las galgas extensiométricas, cuya función principal es medir deformaciones en puntos determinados de una pieza o probeta del material que se desea estudiar. En ocasiones existen ligeras fallas en la obtención de resultados en dichos sensores, tal es el caso de este trabajo, donde se aborda un problema detectado en la medición de deformaciones con rosetas de deformación (ver **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**). Una galga individual permite medir la deformación longitudinal en una dirección (ver **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**). La roseta considerada en este trabajo contiene tres galgas extensiométricas uniaxiales, cada una inclinada de 45 grados respecto a la otra. Un post tratamiento de los datos obtenidos con cada una de las galgas de la roseta permite deducir las deformaciones principales en el punto de medición.



**Figura 1. Galgas tipo uniaxial**



**Figura 2. Galga tipo roseta**

En este trabajo tiene dos objetivos principales. Primeramente se revelan discrepancias en las mediciones de deformaciones con galgas extensiométricas. También se busca encontrar la causa de esta diferencia.

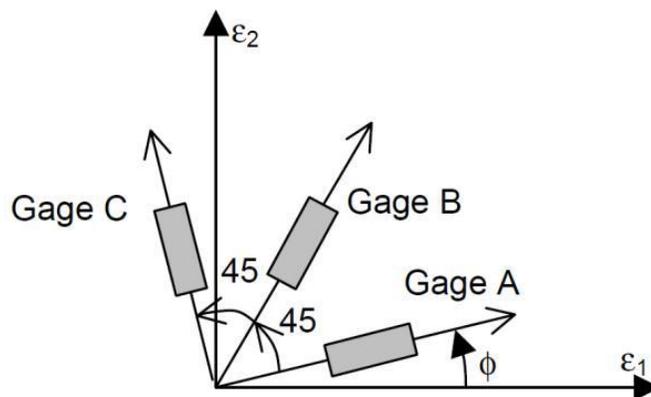
## Errores en mediciones

Actualmente en el Centro de Investigación en Materiales Avanzados (CIMAV) se realizan pruebas mecánicas (tensión y compresión) a polímeros, específicamente al policarbonato, para analizar su comportamiento en diferentes condiciones de operación. Estas pruebas son realizadas en una máquina de ensayos universales INSTRON 3382. Esta máquina es capaz de proporcionar resultados de deformación en la probeta (únicamente axial), pero dichos resultados distan un poco de las condiciones reales a las que se encuentra sometido el material durante el ensayo. Es por ello que se optó por la decisión de utilizar sensores de medición capaces de otorgar resultados más

precisos; en este caso se utilizan galgas extensiométricas para medir deformaciones en un punto específico de la probeta ensayada. Se emplean dos tipos de galga: tipo uniaxial [EA-06-060LZ-120/E] y tipo roseta (rectangulares) [EA-06-060RZ-120/E], proporcionados por la compañía Vishay Micro Measurements. Ambos dispositivos otorgan resultados de deformación en dos direcciones, axial y transversal, pero mediante diferentes métodos. Teóricamente deberían entregar los mismos resultados si es que son utilizadas en ensayos bajo las mismas condiciones de operación y colocadas en el mismo punto de la probeta. Pero en el caso de pruebas realizadas en policarbonato esto no ocurre, ya que se observan discrepancias muy notorias si se hace una comparación entre ambos tipos de galgas.

Las galgas uniaxiales se colocan sobre la dirección del eje donde se desea medir la deformación; de esta manera proporcionan resultados directos de deformación en ese punto y dirección. Sus resultados son directos; no se necesita la aplicación de alguna fórmula para interpretar las deformaciones.

Las galgas de tipo roseta son colocadas sobre el punto de medición sin importar su orientación. Mediante fórmulas preestablecidas se obtienen las deformaciones principales. En este tipo de pruebas de tensión uniaxial, las deformaciones principales son las deformaciones en las direcciones longitudinal y transversal. Las galgas uniaxiales no requieren de alguna fórmula para obtener las deformaciones, pero las galgas tipo roseta emplean el siguiente método para obtener las deformaciones principales sobre los ejes deseados:



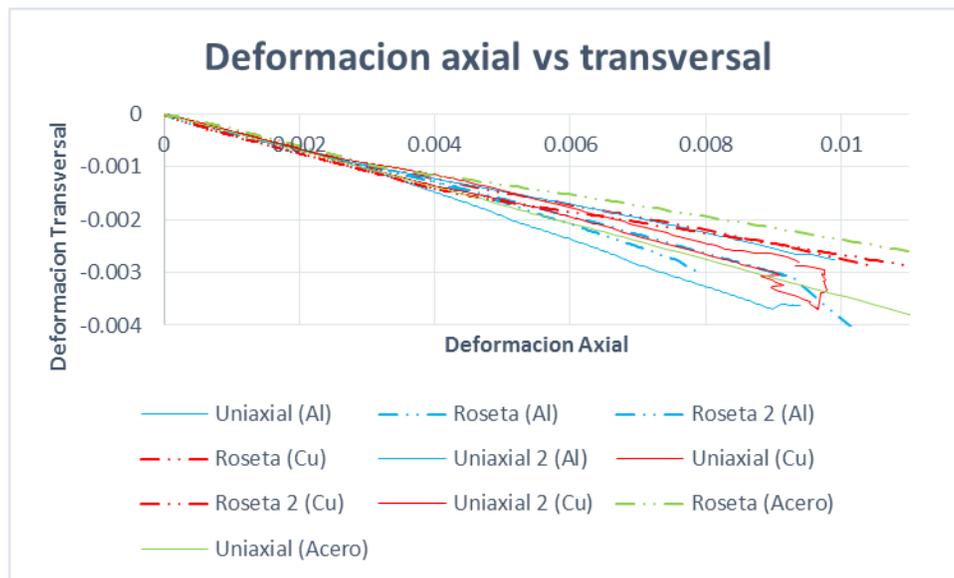
**Figura 3. Dirección de las deformaciones en una galga extensiométrica tipo roseta.**

Se coloca la galga indistintamente de los ejes longitudinales de la probeta y se obtienen las deformaciones principales mediante las siguientes formulas:

$$\epsilon_{1,2} = \frac{\epsilon_A + \epsilon_C}{2} \pm \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{(\epsilon_A - \epsilon_B)^2 + (\epsilon_B - \epsilon_C)^2} \quad (1)$$

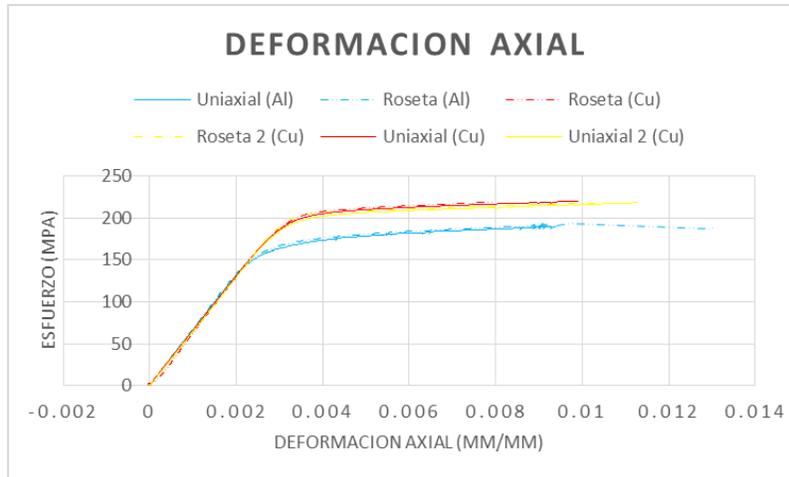
$$\phi = \frac{1}{2} \tan^{-1} \left( \frac{\varepsilon A - 2\varepsilon B + \varepsilon C}{\varepsilon A - \varepsilon C} \right) \quad (2)$$

A continuación se muestran algunas gráficas para revelar estas diferencias de medición. Primeramente, en la Figura 4, se muestra una comparativa de Deformación Axial vs Deformación Transversal para distintos materiales, en este caso, Aluminio, Cobre y Acero. Se confrontan resultados obtenidos de galgas uniaxiales y de roseta. Se observa que, para materiales diferentes al policarbonato las deformaciones tienen tendencias muy parecidas que, a pesar de usar galgas uniaxiales o rosetas de deformación no se observan discrepancias muy notorias como ocurre con el policarbonato.



**Figura 4. Gráfico de Deformación Axial vs Deformación Transversal para distintos materiales.**

Sin embargo, la gráfica anterior no es la única que nos interesa analizar. También se pueden comparar gráficos de Esfuerzo vs Deformación Axial, como el mostrado en la Figura 5. De estos resultados se muestra que la única variación se debe al Módulo de Elasticidad del material, pero en términos generales, las deformaciones permanecen con una tendencia constante y tampoco se observan discrepancias muy notorias.



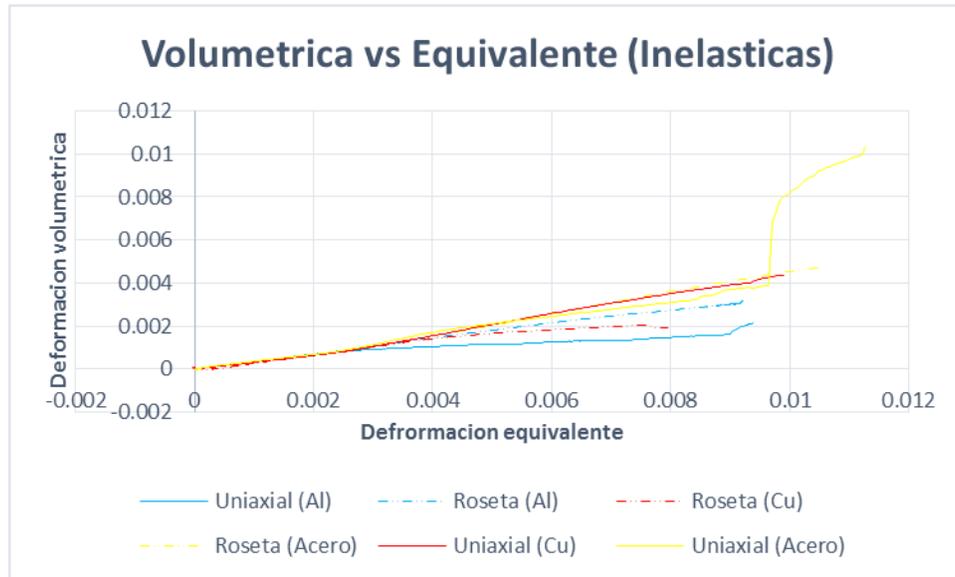
**Figura 5. Gráfico de Esfuerzo vs Deformación Axial para distintos materiales.**

En el caso de plasticidad presentan las siguientes definiciones para obtener nuevos gráficos de comparación.

Esfuerzo	$\sigma$
Módulo de Elasticidad	$E$
Coefficiente de Poisson	$\nu = \frac{\epsilon t}{\epsilon a}$
Deformación axial total	$\epsilon a$
Deformación transversal total	$\epsilon t$
Deformación volumétrica	$\epsilon v = \epsilon a + 2(\epsilon t)$
Deformación axial elástica	$\epsilon a e = \frac{\sigma}{E}$
Deformación axial inelástica	$\epsilon a i n = \epsilon a - \epsilon a e$
Deformación transversal elástica	$\epsilon t e = -\epsilon a e(\nu)$
Deformación transversal inelástica	$\epsilon t i n = \epsilon t - \epsilon t e$
Deformación volumétrica inelástica	$\epsilon v i n = \epsilon a i n + 2(\epsilon t i n)$
Deformación equivalente inelástica	$\epsilon q i n = \frac{2}{3}  \epsilon a i n - \epsilon t i n $

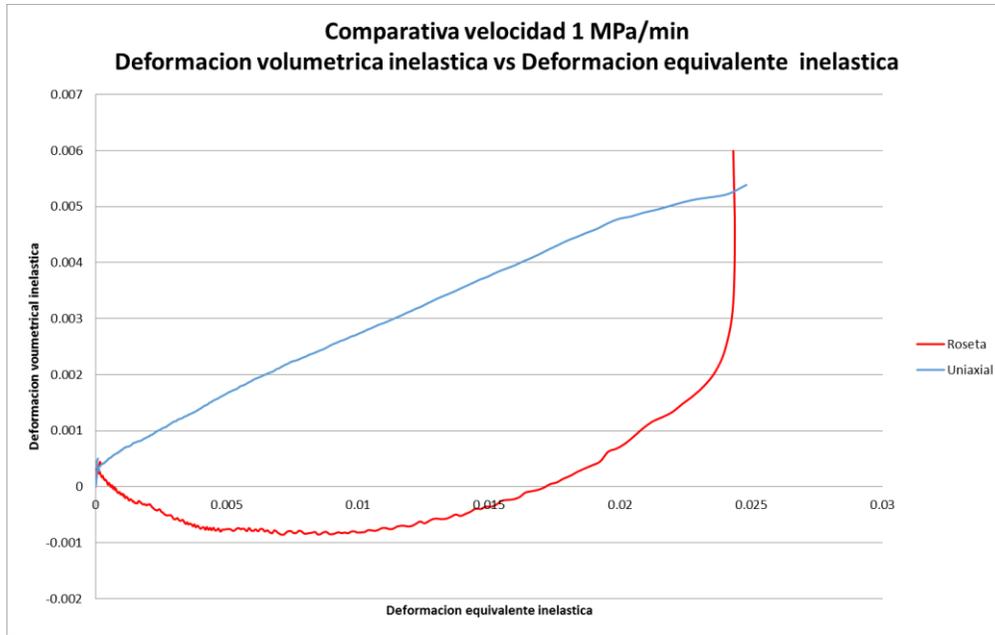
**Tabla 1. Definiciones usadas en plasticidad.**

Utilizando los conceptos anteriores es posible obtener nuevos gráficos comparativos. En la Figura 6 se muestra una comparativa de la Deformación Equivalente Inelástica vs Deformación Volumétrica Inelástica. Se encuentra que, a pesar de ser diferentes materiales la comparación de las deformaciones inelásticas tiende a tener valores positivos desde el principio, se observan ligeras variaciones, causadas por las propiedades físicas de cada material, pero en general todos los resultados son parecidos entre si, sin discrepancias muy notorias.

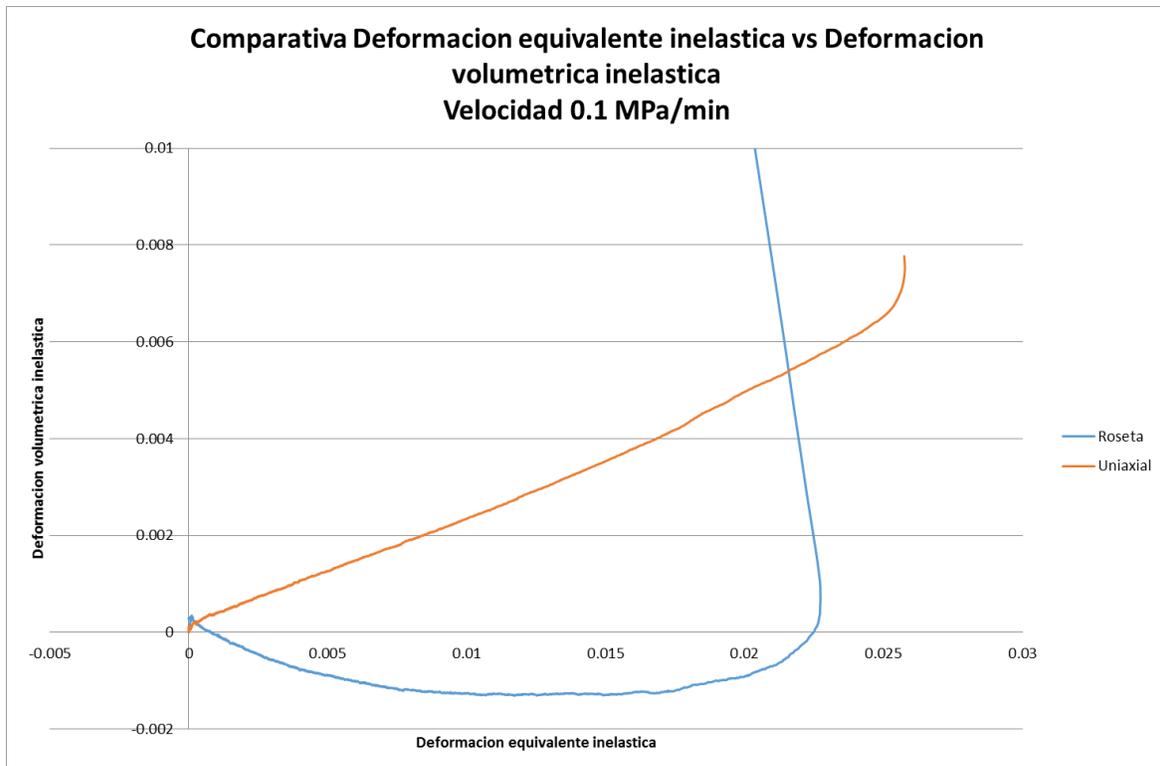


**Figura 6. Gráfico de Deformación Equivalente Inelástica vs Deformación Volumétrica Inelástica.**

En los siguientes gráficos se muestran los resultados obtenidos de pruebas mecánicas al policarbonato. Se aprecia que, independientemente de la velocidad a la que se ensaye el material, se presentan discrepancias. Incluso al principio de las pruebas las galgas tipo roseta arrojan deformaciones negativas. Se busca determinar cuál es el factor que está provocando estas lecturas de resultados. Cabe señalar que se grafican las deformaciones inelásticas, volumétrica y equivalente porque se busca entender el comportamiento del material en condiciones de plasticidad.



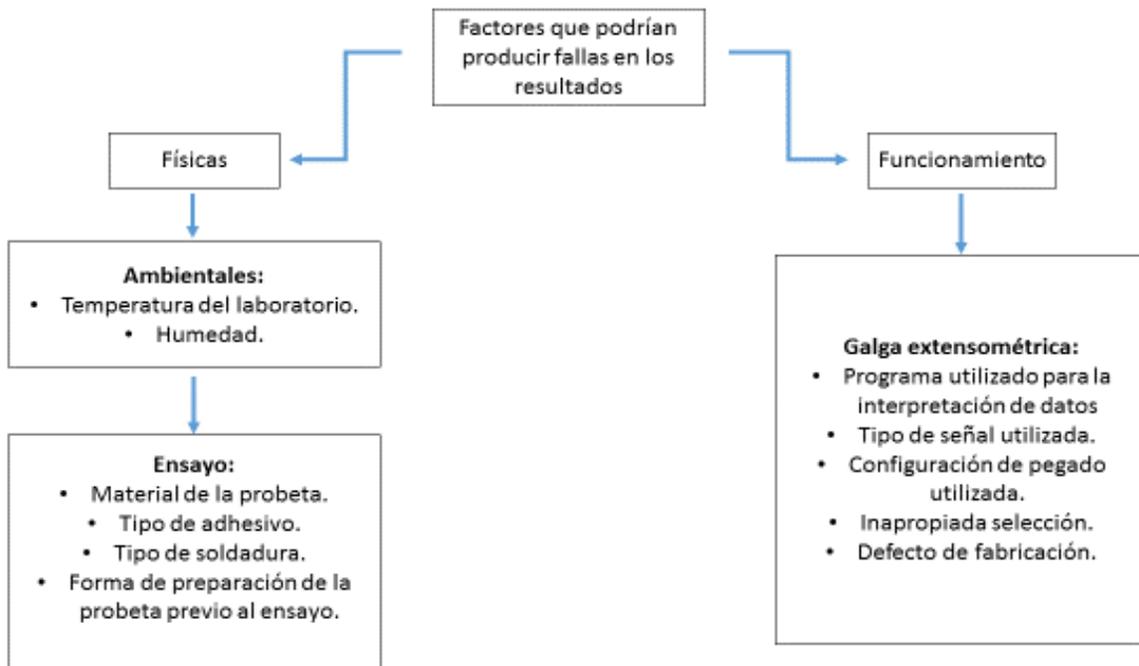
**Figura 7. Comparativa entre galgas tipo roseta y uniaxiales.**



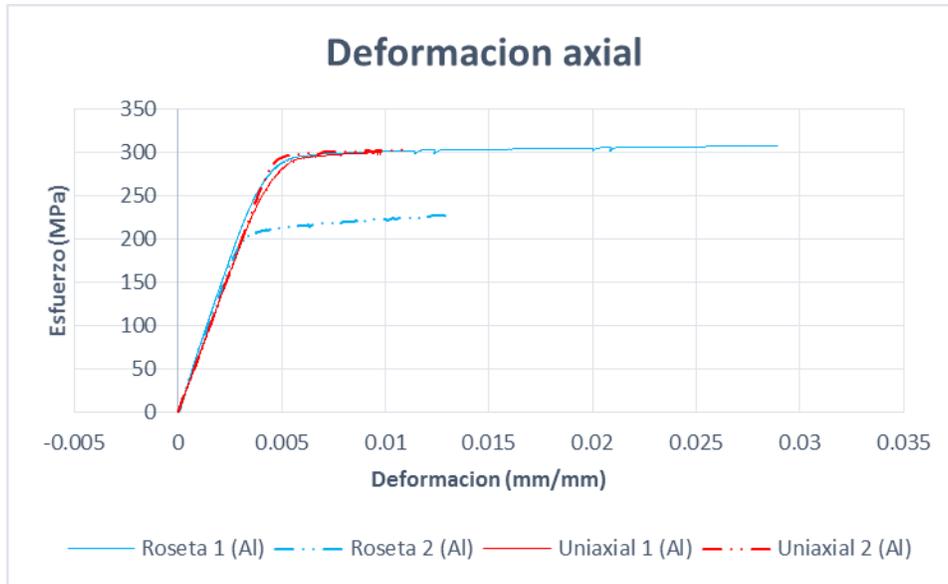
**Figura 8. Comparativa entre galgas tipo roseta y uniaxiales.**

## Análisis de las posibles causas de error

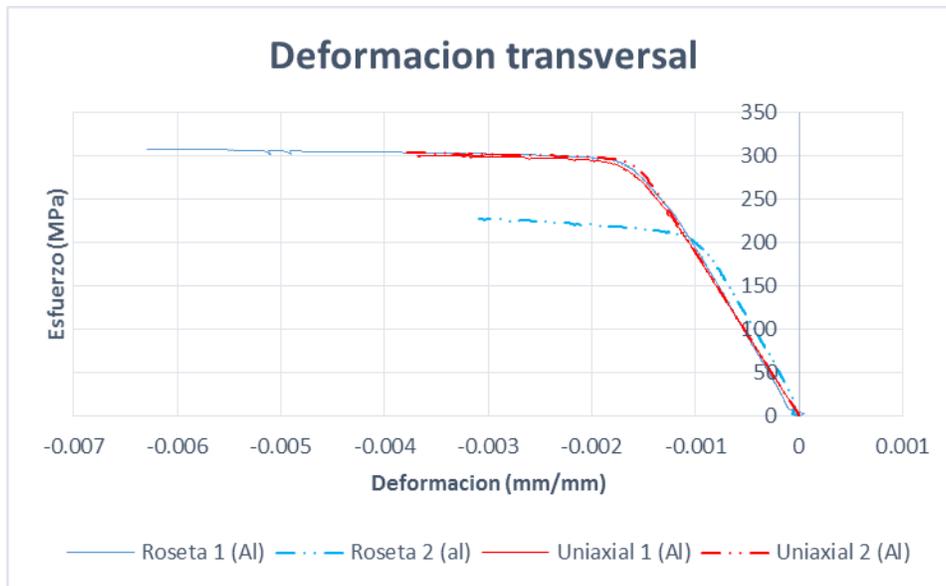
En primera instancia se analizaron los efectos del medio ambiente sobre las galgas extensiométricas, los cuales fueron descartados completamente por el fabricante [3]. De tal forma que se teoriza que las posibles causas podrían ser:



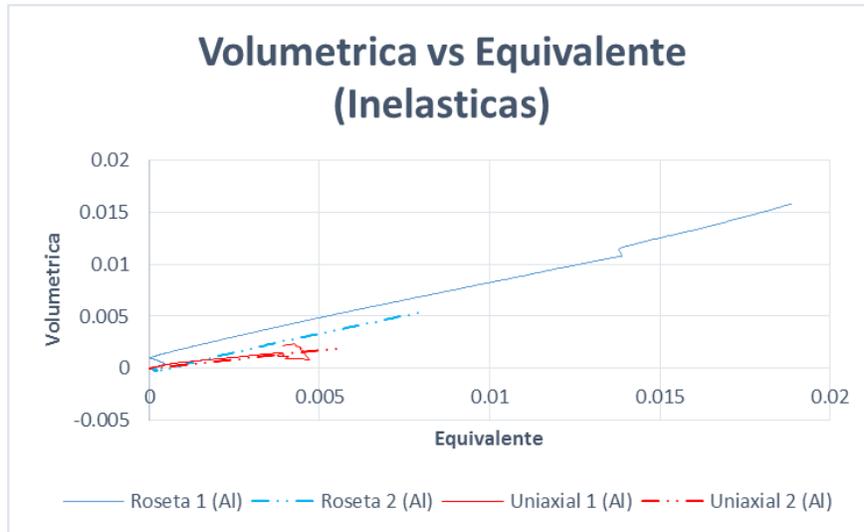
Con todo lo anterior se realizaron pruebas en diferentes materiales, para determinar si la razón de las discrepancias se debía al mismo comportamiento del material. Se ensayan probetas de aluminio donde se colocan galgas uniaxiales y de roseta en ensayos iguales. Únicamente se varía la velocidad de desplazamiento, donde se obtienen los primeros resultados del experimento.



**Figura 9. Deformación axial en probeta de aluminio.**



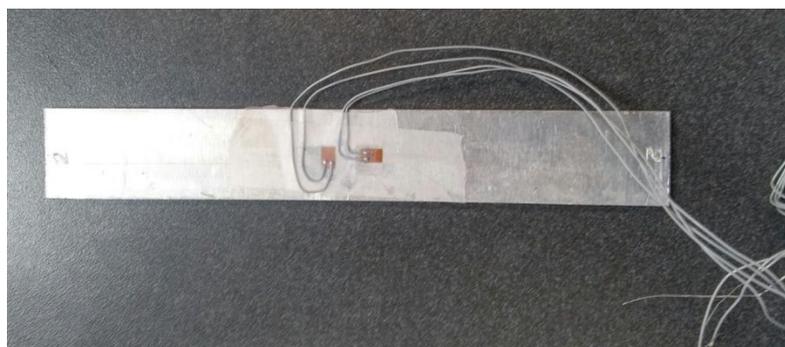
**Figura 10. Deformación Transversal en probeta de aluminio.**



**Figura 11. Comparación de deformaciones en probeta de aluminio.**

Como se puede observar en los primeros experimentos, en estas gráficas no se detecta una variación significativa en las deformaciones. Aunque son diferentes entre sí, todas las curvas mantienen una tendencia, con lo que se da a suponer que el material ensayado puede influir en el comportamiento de las galgas. La importancia de graficar las deformaciones inelásticas radica en conocer el comportamiento del material al rebasar su zona elástica. Como se observa en esta primera aproximación, en ningún momento los resultados son negativos, como sucede con el policarbonato. Cabe señalar que en cada una de estas pruebas, la velocidad de ensayo fue la misma (0.5 mm/min.), y que solamente la prueba (Roseta 1 Al) concluyo antes debido a que la galga se desprendió de su posición original, es por ello que se nota esa variación en los gráficos.

Para el caso de experimentos en Aluminio, se colocaron galgas uniaxiales y de roseta en la misma probeta y en el mismo punto para tratar de obtener lecturas más parecidas.



**Fig. 12 Probetas de aluminio con galgas uniaxiales**

De las posibles causas de la diferencia en las lecturas de deformación mencionadas anteriormente se han descartado algunas; como las de tipo ambiental, ya que el fabricante indica que no influyen en las mediciones [3]; el tipo de adhesivos, porque estos son proporcionados por el fabricante y no influyen directamente en las mediciones, además de que su uso es el indicado para este tipo de pruebas; la forma de preparación de la prueba también se ha descartado, ya que se han preparado probetas con variaciones en el método indicado por el fabricante y tampoco influyen en los resultados; y finalmente el programa utilizado para la interpretación de los datos hasta el momento no ha presentado fallas junto con la elección inicial de este conjunto de galgas extensiométricas, que fueron escogidas basándose en los parámetros y limitaciones de las pruebas a efectuarse, lo cual indica que su elección es la correcta.

## **Conclusiones y trabajos futuros**

Hasta el momento se ha identificado una posible causa del fenómeno antes mencionado, el comportamiento del material, todavía no se puede asegurar que esta sea la razón principal de las variaciones en las mediciones ya que aún falta por descartar el resto de posibles causas involucradas en estas discrepancias de medición y validar las afirmaciones es por ello que se realizan más experimentos para determinarlas.

La investigación está enfocada a determinar la causa y corregirla para de alguna forma hacer que ambos tipos de galga extensométrica arrojen los mismos resultados o que su rango de error sea el mínimo posible, otra posible causa es que, al usar el tipo de galgas estudiantiles que en este experimento se estudian podría darse el caso de que no sean tan exactas como las utilizadas para la industria.

La opción más factible hasta el momento, es usar galgas de tipo uniaxial para los experimentos, ya que están arrojando resultados más directos, y en función de su colocación se obtienen los resultados sobre los ejes deseados, de tal manera que se recomienda usar este tipo de galgas hasta determinar de manera contundente cual es la razón causante de las discrepancias y encontrar una solución para ello.

## Notas

- Las Figuras 7 y 8 son tomadas del trabajo de doctorado del M. en I. Alfredo Alán Rey Calderón

## Referencias

1. Micro Measurements. (2017). Strain Gage Selection: Criteria, Procedures, Recommendations. 01/09/2017, de Vishay Micro Measurements Sitio web: <http://www.vishaypg.com/docs/11055/tn-505.pdf>
2. Micro Measurements. (2014). Strain Gage Rosettes: Selection, Application and Data Reduction. 01/09/2017, de Vishay Micro Measurements Sitio web: <http://www.vishaypg.com/docs/11065/tn-515.pdf>
3. Micro Measurements. (2017). Technical Notes. 01/09/2017, de Vishay Micro Measurements Sitio web: <http://www.vishaypg.com/micro-measurements/stress-analysis-strain-gages/technotes-list/>
4. J. Lemaitre and J.-L. Chaboche. (1985). Mechanics of solid materials. Paris, Francia: Cambridge University Press.