

## Desarrollo de una Metodología Para la Fabricación de Sensores Utilizados en Detección de Fisuras

Lisandro J. Kaszuba <sup>a\*</sup>, Omar F. Maggiolo <sup>a</sup>, Roberto N. Schuster <sup>a</sup>, Luis A. Urbani <sup>a</sup>, Guillermo A. Mudry <sup>a</sup>, Gabriel A. Tarnowski <sup>a</sup>

<sup>a</sup>LABSE, FI-UNaM, Juan Manuel de Rosas 325, Oberá, Misiones, Argentina

e-mails: [joaquinkaszuba@gmail.com](mailto:joaquinkaszuba@gmail.com), [maggiolofederico@gmail.com](mailto:maggiolofederico@gmail.com), [schusterrobertonicolas@gmail.com](mailto:schusterrobertonicolas@gmail.com),  
[ctt.urbani@gmail.com](mailto:ctt.urbani@gmail.com), [guillermomudry@gmail.com](mailto:guillermomudry@gmail.com), [gabriel.tarnowski@gmail.com](mailto:gabriel.tarnowski@gmail.com)

### Resumen

En el presente artículo se detalla una metodología para identificar el inicio y la propagación de fisuras que se originan en componentes mecánicos de gran tamaño. Inicialmente se presenta una breve descripción del uso de sensores para detección de fisuras en componentes y probetas sometidas a esfuerzos variables indicando sus ventajas y limitaciones. Luego se propone una metodología para la fabricación de sensores de tipo crack gauge de grandes dimensiones basándose en el uso de tintas conductoras utilizadas en la detección de fisuras los cuales son adaptables a la geometría del componente a analizar. Al finalizar, son presentados los gráficos comparativos entre la utilización de sensores comerciales y los sensores fabricados con la metodología propuesta observando que responden aproximadamente de la misma forma ante la presencia de una fisura. Pero concluyendo que el método experimental presenta mayor facilidad de instalación, con respecto a los comerciales.

**Palabras Clave** – *Componente Mecánico, Crack Gauge, Fisura, Metodología, Probetas, Sensor.*

### 1. Introducción

Parte del estudio fracto-mecánico de componentes y materiales sometidos a esfuerzos cíclicos consiste en detectar el surgimiento y posterior crecimiento de fisuras en los mismos, como se observa en la Fig. 1.



Fig. 1. Crack. [1]

El análisis del crecimiento de las fisuras con respecto al número de ciclos de aplicación de esfuerzos puede ser realizado de varias maneras.

\*Autor en correspondencia.

Una técnica, por ejemplo, consiste en verificar con instrumentos de medición la longitud de la fisura luego de un determinado número de ciclos de esfuerzos aplicados. Esta técnica tiene como desventaja que se necesita tener acceso a la región del componente o probeta en donde se está realizando la medición de la fisura durante todo el periodo de tiempo que dura el estudio.

Otra técnica comúnmente utilizada consiste en la utilización de sensores cuya función es la detección y determinación del tamaño de la fisura por medio de variaciones en la señal de respuesta del mismo. En estos sensores, denominados crack gauges el sensor responde ante variaciones en la geometría de la fisura que se origina en el elemento de estudio, permitiendo así inferir el tamaño que la misma ha desarrollado. La técnica requiere que el sensor se encuentre posicionado en la dirección de avance de la fisura orientado transversalmente a la misma.

Esta técnica posee como principal ventaja que, una vez finalizado el montaje del sensor, la misma no depende de la intervención de un técnico como es el caso de la técnica de medición de distancia. Por otro lado, la utilización de sensores de tipo crack gauges tiene como desventaja su reducido tamaño de los sensores comerciales. Esto hace que sea necesario saber la dirección de propagación de la fisura en el componente antes de realizar el montaje del sensor. Esta es una limitación de la técnica, sobre todo en el estudio de componentes de gran tamaño en los cuales la dirección de propagación de la fisura no es conocida, por lo que lograr que la fisura atraviese el sensor no siempre es posible.

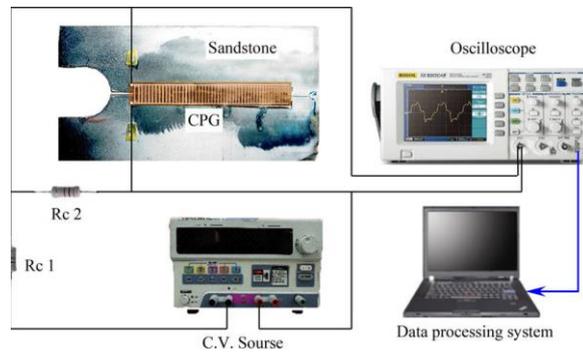
Ante la necesidad de poder estudiar la propagación de una fisura que puede presentarse en una pieza mecánica de gran tamaño, surge la necesidad de contar con sensores de tipo crack gauges de tamaño adecuado a las dimensiones del componente estudiado. Esto permitiría aumentar las probabilidades de que la fisura atraviese la región pudiendo así detectar el crecimiento de la misma.

El presente trabajo propone una metodología para la fabricación de sensores de tipo crack gauges de grandes dimensiones basándose en el uso de tintas conductoras. Se describe el proceso de fabricación y validación de los mismos por medio de ensayos mecánicos. Finalmente son mostrados los resultados obtenidos utilizando un sensor fabricado con la metodología propuesta y comparándolo con los resultados obtenidos con sensores comerciales.

## **2. Desarrollo**

### *2.1. Principio de funcionamiento de sensores comerciales*

Los sensores medidores de propagación de grietas o “crack propagation gauges” consisten en resistencias separadas eléctricamente y su principio de funcionamiento es la interrupción de la conductividad eléctrica. Los “crack gauges” son básicamente líneas conductoras finas incrustadas en el revestimiento de un material portado. La interrupción eléctrica se supervisa con un adquisidor de datos, similar al circuito de la Fig. 2 [2], midiendo las líneas de resistencia, las cuales aumentan su valor tendiendo al infinito cuando se interrumpe su continuidad debido a la fisura, abriendo así el circuito eléctrico.



**Fig. 2. Ejemplo de circuito para adquirir los datos.**

Para el correcto funcionamiento de los sensores, estos deben ser adheridos a la superficie de la probeta o componente que se desea evaluar. Para esto, los fabricantes establecen las operaciones necesarias para realizar el correcto montaje de los sensores, como el de la Fig. 3. Estas operaciones se deben realizar con delicadeza ya que, dada la forma constructiva de los sensores comerciales, son frágiles para el manejo [3].



**Fig. 3. Crack propagation gauges marca HBM.**

## 2.2. Principio de funcionamiento propuesto

En los últimos años han surgido en el mercado productos conocidos con el nombre de tintas conductoras. Estas tintas poseen las características de poder ser utilizadas trabajos de pintado o delineado como tintas normales, con la ventaja de que las mismas poseen una elevada conductividad eléctrica. Estas tintas pueden ser aplicadas en la superficie de piezas de diferentes tipos de materiales, entre los cuales se cuentan metales.

Una vez que la tinta se encuentra seca posee la característica de comportarse como un conductor eléctrico, permitiendo la circulación de una corriente eléctrica.

En base a esta característica, estos materiales podrían ser utilizados para la conformación de un arreglo de líneas conductoras en una configuración similar a la que presentan los sensores de tipo crack gauges utilizados comercialmente. Al no requerir contar con un elemento portador que contenga los conductores como es el caso de los sensores comerciales, las dimensiones de los sensores fabricados en base a estos materiales podrían ser de dimensiones ilimitadas.

De esta manera, los sensores de tipo crack gauges fabricados en base a esta metodología podrían resolver la principal limitante que poseen los sensores comerciales relacionados con las dimensiones máximas de los mismos.

### 2.3. Montaje de sensores comerciales

Es el método más utilizado hoy en día y se utiliza en aquellos ensayos en los cuales se sabe desde un principio la región y dirección de inicio de una fisura. De acuerdo a las recomendaciones de los fabricantes se procedió a la instalación una unidad de este tipo de sensores en una probeta de prueba, cumpliendo los siguientes pasos:

1) *Preparación de la superficie y limpieza de la superficie*: Se procede a pulir la superficie con diferentes tipos de grano de lija para lograr la uniformidad de la superficie y la eliminación de imperfecciones que presenta el material, para lograr el mejor pegado. La Fig. 4 muestra el proceso de lijado sobre la región elegida para instalar el sensor.

Mientras que la Fig. 5 ilustra el aspecto de la superficie que se obtiene al finalizar el proceso de lijado.



**Fig. 4. Preparación de superficie.**



**Fig. 5. Superficie pulida.**

2) *Limpieza de la superficie*: Finalizada la etapa de lijado, es requerido que la superficie lijada se limpie de tal manera que se eliminen las impurezas de la superficie preparada. Para lograr esto, se aplica un solvente como ser acetona o alcohol isopropílico y, con ayuda de una servilleta de papel, se limpia la superficie hasta evidenciar que no haya más impurezas en la superficie a trabajar.

3) *Pegado del sensor y de los terminales*: Luego de la preparación y limpieza de la superficie, se procede a pegar el sensor sobre la superficie preparada. Para conseguir esto, se retira el sensor de su embalaje y se procede a posicionarlo y alinearlos con el terminal a utilizar. Para conseguir lograr esta operación se trabaja sobre la superficie de un vidrio para ubicarlos en la posición adecuada. Logrado esto, se aplica un adhesivo de base cianocrilato sobre la superficie de la probeta, luego de trasladan el sensor y los terminales a la superficie de la probeta en la región que contiene el adhesivo, como se visualiza en la Fig. 6.



**Fig. 6. Pegado de sensores.**

4) *Cableado*: Una vez que finaliza el secado del pegamento, se procede a realizar la unión de los cables y los terminales con soldadura para la futura instrumentación del sensor.

5) *Instrumentación y adquisición de datos*: Para finalizar, se conecta los cables del sensor, que se observan en la Fig. 7, al adquisidor de datos National Instruments “NI USB – 6008/6009” y se realiza el ensayo, relevando mil datos por segundo.



**Fig. 7. Probeta preparada para el futuro ensayo.**

#### 2.4. *Montaje de sensores por el método propuesto*

Con este método, lo que se busca es obtener de manera experimental un procedimiento para la fabricación de este tipo de sensores. Tomando como referencia las características geométricas de los sensores comerciales se procedió al desarrollo del nuevo sensor utilizando el método explicado a continuación:

1) *Preparación de la superficie*: Se procedió a pulir y limpiar la superficie siguiendo la misma metodología utilizada para los sensores comerciales.

Finalizada esta etapa, se procedió luego a aplicar una capa de material aislante. La función de esta capa, es la de aislar los elementos conductores del sensor de la superficie metálica de la probeta que también es conductora. La capa aislante consiste en una capa de adhesivo de base cianocrilato aplicado sobre toda la superficie de la probeta a trabajar.

2) *Verificación de la aislación superficial*: Mediante un ensayo de continuidad se verificó la aislación de la superficie aislada, este ensayo se realizó una vez que el adhesivo aislante finalizó el proceso de cura sobre la superficie tratada.

3) *Medición de la superficie y preparación de plantilla*: Finalizada la verificación de la aislación se procedió a medir la superficie a cubrir por el sensor. Esta operación es necesaria a fin de no fabricar una plantilla que supere los límites de aislación obtenidos. Una vez obtenidas las medidas del sensor se diseñó la plantilla para el futuro pintado de las tiras conductoras del mismo, la plantilla se realizó en un material vinílico autoadhesivo.

4) *Pegado de los terminales*: El pegado de terminales se realiza luego de comprobar la uniformidad de la capa aislante, el pegado de los mismos se realiza con el pegamento especial para este tipo de elementos mediante la disposición de la plantilla previamente establecida y como se ve en la Fig. 8.



**Fig. 8. Pegado de terminales.**

5) *Pegado de plantilla y pintado del sensor*: Inmediatamente después de la colocación de los terminales, se procede a pegar la plantilla y pintar los sensores con tinta conductora, Fig. 9, este proceso resulta complejo ya que el pegado de la plantilla debe ser realizado de manera cuidadosa para lograr que las líneas conductoras presenten uniformidad en su espesor.



**Fig. 9. Pegado de plantilla y pintado de sensores.**

6) *Cableado*: Una vez finalizado el secado de las líneas conductoras, se procede como en la Fig. 10, a realizar la unión de los conductores y los terminales con soldadura para culminar con la instrumentación del sensor.



**Fig. 10. Soldado de los cables a los terminales.**

6) *Aplicación del revestimiento de protección:* Con la finalidad de proteger y aislar las líneas conductoras del sensor, un revestimiento de protección es aplicado en toda la superficie del mismo. El material que se utiliza para tal fin es un revestimiento comercial de base siliconado.

7) *Instrumentación y toma de datos:* Para finalizar, se conecta el sensor al adquisidor de datos National Instruments “NI USB – 6008/6009” y se realiza el ensayo, relevando mil datos por segundo.

### 2.5. *Evaluación del desempeño de la metodología propuesta*

Para evaluar el desempeño de los sensores fabricados en base a la metodología propuesta, se llevó a cabo un ensayo mecánico de tracción sobre una probeta en la cual dos tipos de sensores fueron montados: por un lado, un sensor de tipo comercial y por el otro un sensor fabricado en base a la utilización de tintas conductoras. Esta probeta fue montada en una maquina de ensayo de tracción para que, al aplicar una carga de tracción controlada, se induzca el surgimiento y posterior crecimiento de una fisura en dirección perpendicular a la dirección de la carga aplicada.

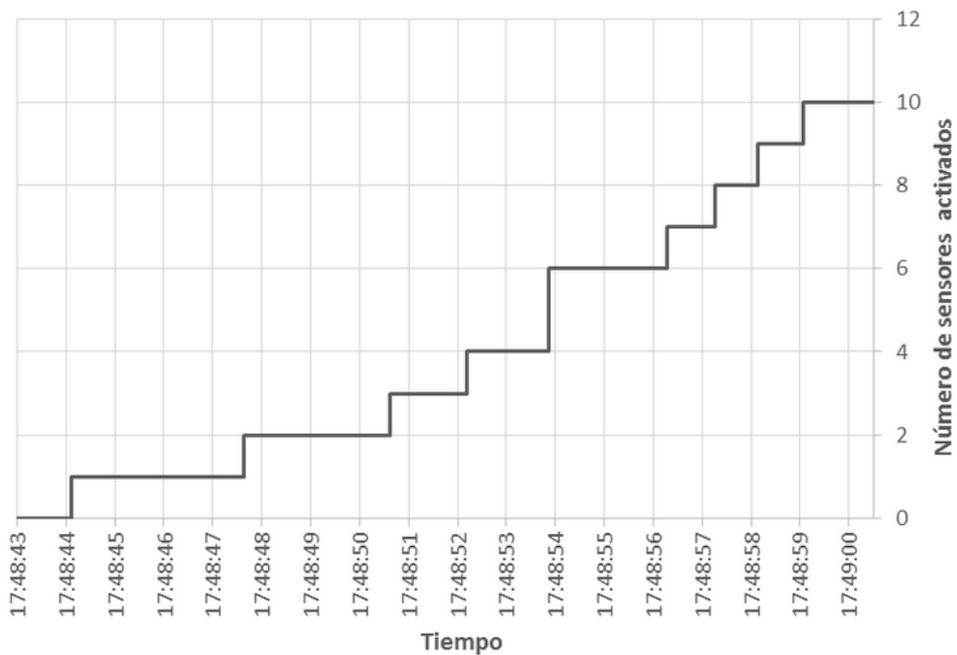
Durante el ensayo de tracción fueron registradas las señales eléctricas de los sensores con un adquisidor a medida que la fisura se propagaba por la probeta, una de las probetas ensayadas puede ser observada en la Fig. 11.



**Fig. 11. Probeta en pleno ensayo.**

### 2.6. Resultados obtenidos

Los datos obtenidos durante el ensayo fueron procesados y graficados, donde para el caso del sensor comercial, el grafico obtenido se presenta en la Fig. 12

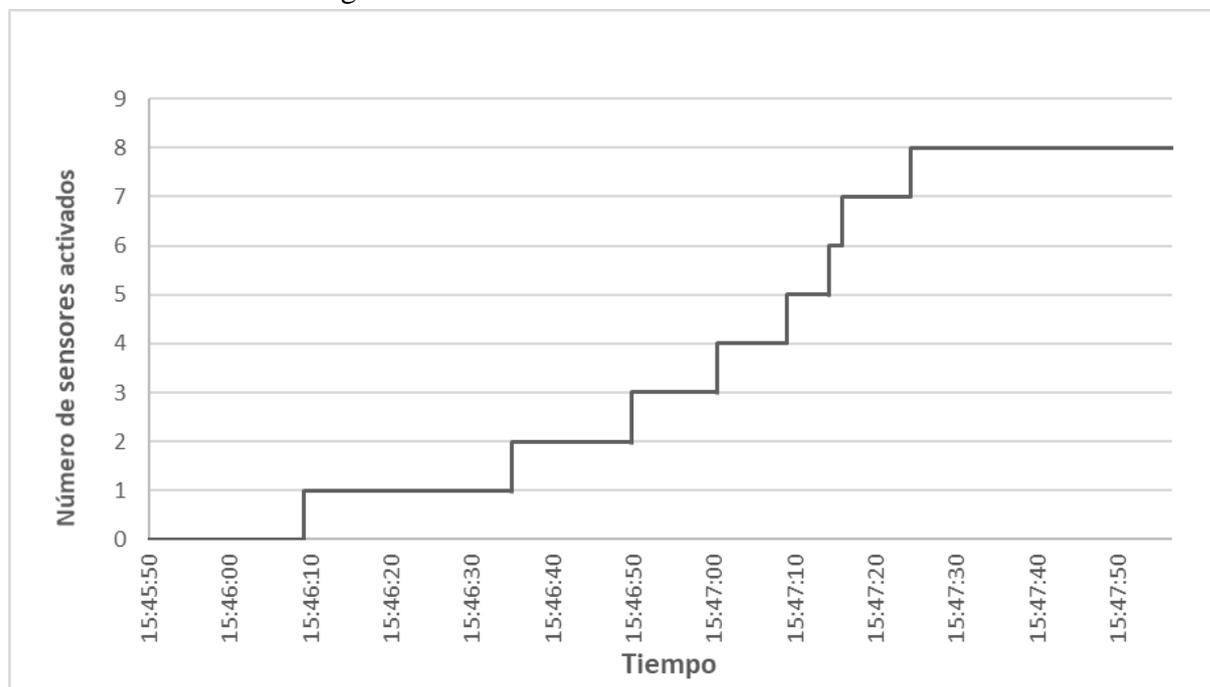


**Fig. 12. Activación de sensores comerciales.**

Esta indica una serie de escalones que representan el incremento en la resistencia eléctrica del sensor a medida que las líneas conductoras comienzan a cortarse. Esto permite inferir como se va

propagando la fisura en la probeta. Cada escalón discreto representa una elevación en el valor de la resistencia que corresponde a la ruptura individual de cada línea conductora.

Para el caso del sensor desarrollado con la metodología propuesta, la indicación del incremento de la fisura se observa en la Fig. 13.



**Fig. 13. Activación de sensores experimentales.**

Obteniendo en la misma una respuesta similar a la respuesta del sensor comercial, pero en un rango de tiempo mayor ya que la fisura simulada en este caso, se propagaba más lentamente que en el caso anterior, del sensor comercial, además cabe destacar que el ancho del sensor comercial es menor que al del propuesto.

Realizando el mismo análisis entre los métodos, con diferentes tiempos de propagación de fisuras, se observan entonces resultados similares.

### 3. Conclusiones

El estudio realizado nos permitió encontrar una metodología diferente para analizar la propagación de fisuras en piezas mecánicas de grandes tamaños, el cual involucra sensores fabricados con tinta conductora.

La diferencia obtenida entre los dos métodos, el comercial y el experimental es mínima ya que ambos sensores responden aproximadamente de la misma forma ante la presencia de una fisura en la pieza mecánica donde están ubicados, pero concluyendo que el método experimental presenta mayor facilidad en el instalado de los sensores y es menor el cuidado que se tiene que tener al momento de instalarlos, con respecto a los comerciales.

Sin embargo, será necesario realizar en el futuro estudios adicionales para optimizar el proceso de montaje de sensores con la metodología propuesta. Hará falta definir aún, los parámetros

óptimos de aplicación de cada una de las variables descritas en el presente trabajo cómo ser espesor de la película del material aislante, espesor y ancho óptimo de línea conductora, entre otros.

#### 4. Referencias

- [1] *MTS Systems Corporation*, [https:// www.mts.com](https://www.mts.com)
- [2] *M. Wang*, “Modelling of crack propagation in rocks under SHPB impacts using a damage method,” *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures*, vol. 2, no. 8, pp. 1699-1710, *Abbrev. August, 2019*, DOI. 10.1109. ffe.13012
- [3] “Strain Gauges Absolute PDF catalog” 2018, *HBM, Darmstadt, Germany [Online]*. Available: <https://www.hbm.com/en/2073/strain-gauge-pdf-catalog/>