

## Verificación de Funcionamiento de Sensores Extensiométricos Especiales Mediante Ensayo en Probeta C(T)

Lucas G. Ruiz<sup>a</sup>, Lisandro J. Kaszuba<sup>a</sup>, Federico O. Maggiolo<sup>a</sup>, Roberto N. Schuster<sup>a</sup>,  
Guillermo A. Mudry<sup>a</sup>, Gabriel A. Tarnowski<sup>a</sup>.

<sup>a</sup> *Laboratorio de Simulación Numérica y Ensayos Mecánicos (LABSE), Facultad de Ingeniería - UNaM, Juan Manuel de Rosas 325, Oberá, Misiones, Argentina.*

e-mails: [ruizlg98@gmail.com](mailto:ruizlg98@gmail.com) , [joaquinkaszuba@gmail.com](mailto:joaquinkaszuba@gmail.com), [federico.maggiolo@fio.unam.edu.ar](mailto:federico.maggiolo@fio.unam.edu.ar),  
[schuster@fio.unam.edu.ar](mailto:schuster@fio.unam.edu.ar) , [guillermo.mudry@fio.unam.edu.ar](mailto:guillermo.mudry@fio.unam.edu.ar) , [gabriel.tarnowski@fio.unam.edu.ar](mailto:gabriel.tarnowski@fio.unam.edu.ar)

---

### Resumen

En el presente artículo se describe un procedimiento para verificar el método de detección de avances de fisuras por fatiga por medio de galgas extensiométricas especiales del tipo RDS (*Strain gauge RDS*), a través de un ensayo en probeta C(T) normalizada, experiencia realizada en el laboratorio de la Comisión Nacional de Energía Atómica (CNEA). Inicialmente se presenta una breve descripción del tipo de sensor utilizado, como se adquirieron y procesaron las señales, así como también como se procedió a realizar el ensayo y los equipos utilizados en el mismo. Al finalizar, son presentados los resultados obtenidos y se realiza una breve conclusión estableciendo el correcto funcionamiento de los sensores ante el crecimiento de la fisura presente.

**Palabras Clave** – *Componentes Mecánicos, Ensayo Fractomecánico, Fisura, Probeta C(T), Strain gauge RDS,*

### 1. Introducción

La mecánica de la fractura es una rama de la ingeniería de materiales y la mecánica de sólidos, que se enfoca en el estudio del comportamiento y la propagación de las fracturas en materiales, así como la resistencia de los mismos frente a la fractura. Una de las técnicas más comunes para realizar estas pruebas es el ensayo de fractura en probetas C(T) (*Compact Tension*, en inglés).

Las probetas C(T) son configuraciones de muestras estandarizadas según la norma *ASTM E399* [1], que se utilizan para realizar ensayos de fractura mediante la aplicación de un esfuerzo cíclico. Estas probetas tienen una forma característica, la cual posee una entalla central para facilitar el inicio y la propagación de una fisura. El ensayo se lleva a cabo en una máquina, donde a través de oscilaciones en la carga se crea la falla por fatiga.

Teniendo en cuenta los trabajos realizados anteriormente en materia de detección de avance de fisuras en componentes mecánicos, en los cuales fueron utilizadas galgas extensiométricas de tipo RDS (*Strain Gauge RDS*, en inglés). Se requiere realizar ensayos controlados, donde se puede contrastar visualmente el crecimiento de la grieta por fatiga y así, comprobar la capacidad de detección de este tipo de sensores para detectar la propagación de las mismas y verificar este método.

Por lo tanto, en conjunto con el Departamento de Caracterización y Fractomecánica, del Centro Atómico Constituyentes de la CNEA (Comisión Nacional de Energía Atómica) y haciendo uso de

las instalaciones de su laboratorio, se realizó la experiencia pertinente para la evaluación de este tipo de sensores.

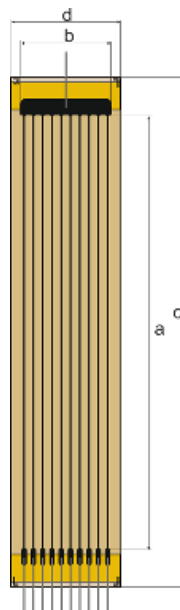
## 2. Desarrollo.

### 2.1 Sensor Utilizado.

Para el desarrollo de este ensayo, fue necesario colocar en una de las caras de la probeta, un tipo especial de galga extensiométrica que tiene la particularidad de detectar el crecimiento de la fisura a medida que avanza la misma, esto lo realiza por medio de los filamentos, que se encuentran equidistantes entre sí, y que presentan la característica de cortarse ante la presencia de una fisura. El modelo de galga utilizado es el RDS40 de la marca HBM [2], cuyas características se presentan en la Tabla 1 y en la Fig. 1 se presenta una imagen ilustrativa del mismo.

**Tabla 1. Características de Strain Gauge RDS40 de la marca HBM. [2]**

Resistencia Nominal	Dimensiones [mm/pulgadas]				Número de Filamentos	Voltaje de Excitación Máximo
	Longitud de Filamentos	Ancho Grilla de Medición	Material Portante			
$\Omega$	<b>a</b>	<b>b</b>	<b>c</b>	<b>d</b>		V
28	40 1,575	8,4 0,331	47 1,85	10 0,394	0,85 0,033	10 2,5



**Fig. 1. Imagen ilustrativa de Strain Gauge RDS40 de la marca HBM.[2]**

Estos sensores pueden ser conectados de dos maneras. La primera es utilizando medición de resistencias a través de los filamentos. Por otro lado, la segunda, utilizada en este ensayo, el modo *on-off*, que es el que permite detectar tensión a través de cada filamento del sensor.

## 2.2 Acondicionamiento de Señal.

Para realizar el acondicionamiento de señales que arroja el sensor se utilizó una placa de acondicionamiento de alimentación y señal, que tiene como objetivo energizar el sensor RDS40 con una tensión estable de 2,5 V, y en caso de que alguna de las líneas de detección de fisura se vea interrumpida por el crecimiento de ésta, asegurar que la entrada del adquisidor no quede flotante.

En la Fig. 2 se presenta el circuito esquemático utilizado, en el mismo se puede observar la existencia de 10 resistores “pull-down”; los cuales evitan que los canales del adquisidor queden en modo flotante ante la rotura de las líneas del sensor, llevando a los mismos al valor de referencia de tensión. (GND).

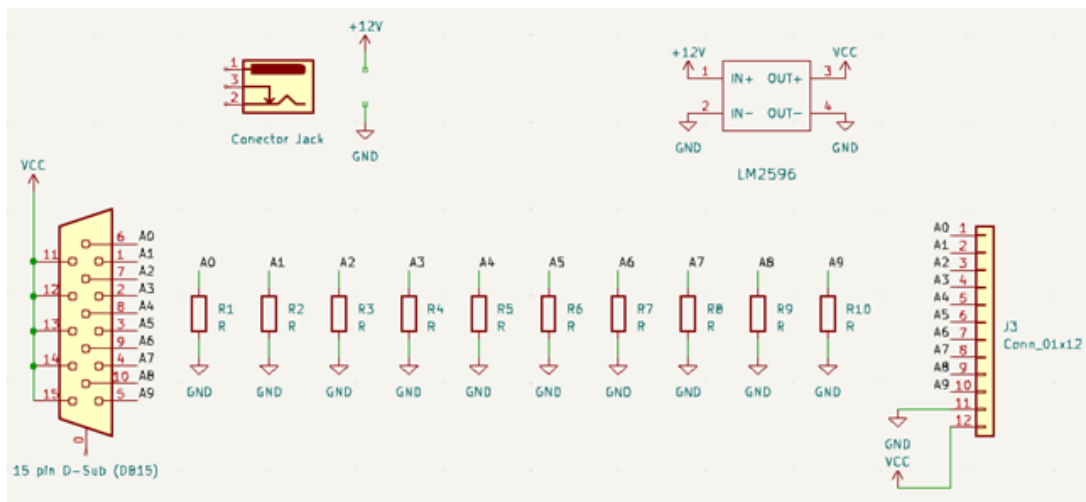


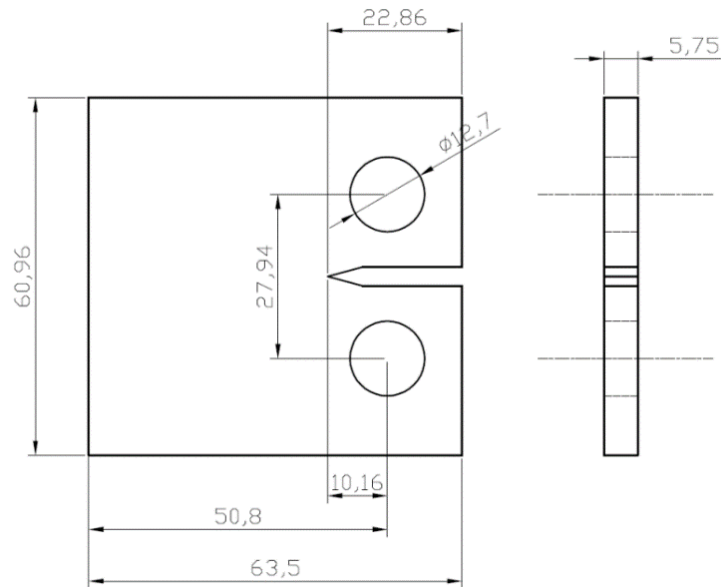
Fig. 2. Circuito esquemático del acondicionador de alimentación y señal.

El circuito contiene un regulador de tipo “Buck-Boost”, para obtener un voltaje estable de alimentación del sensor igual a 2,5 V, ante un rango de voltaje de entrada al circuito amplio. Este circuito fue diseñado y fabricado por especialistas en el LABSE.

## 2.3 Probeta

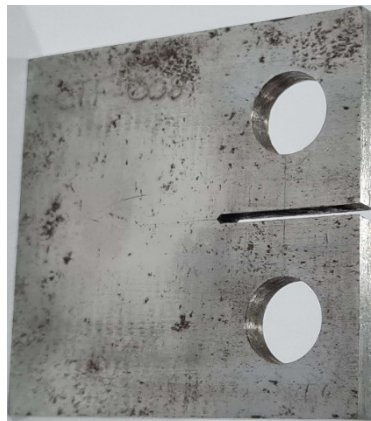
Para la ejecución de este ensayo, se utilizó una probeta compacta de tensión, cuyas dimensiones se presentan en la Fig. 3. El material de la probeta es un acero SAE 1010, que en este caso no es de relevancia, debido a que lo importante es nuclear una fisura, que la misma se propague y que los sensores detecten el crecimiento de esta de una manera controlada.

Para la realización de la muestra se utiliza la norma ASTM E399, donde en su anexo 4 especifica las dimensiones que deben respetarse para la fabricación de estas muestras que son utilizadas para este tipo de ensayo.



**Fig. 3. Dimensiones, en milímetros, de la probeta C(T) utilizada.**

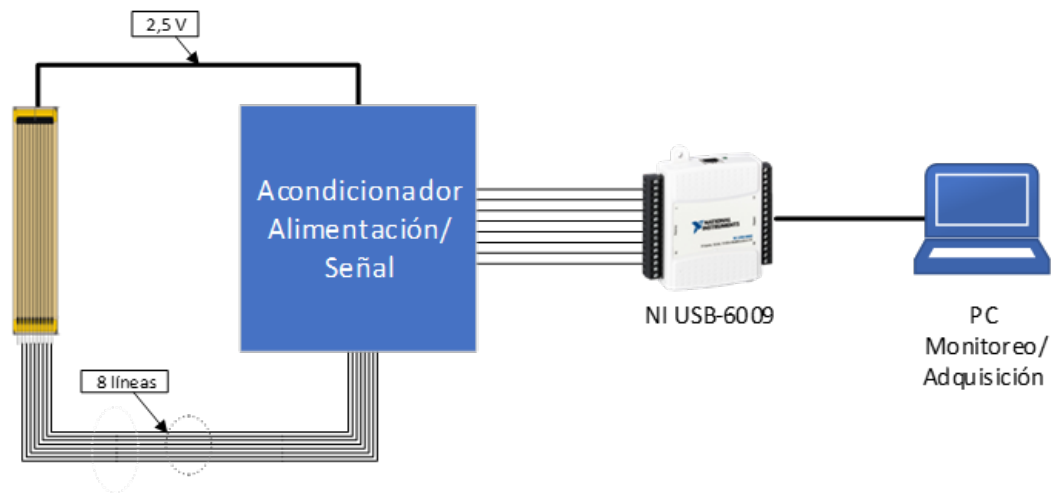
Una foto de la probeta, se presenta a continuación en la **Error**: no se encontró el origen de la **referencia**, se puede observar que la misma presenta una entalla con dos perforaciones, desde donde las mordazas se anclan para vincularla a la máquina servo-hidráulica.



**Fig. 4. Probeta C(T) utilizadas en los ensayos.**

#### 2.4 Equipo de ensayo

Para la realización del ensayo, se tiene por un lado el equipo de monitoreo y adquisición para el sensor. El mismo consta de la placa de acondicionamientos de señal/alimentación, el adquisidor NI USB-6009 de la marca *National Instruments* y una computadora para la visualización y almacenamiento de los datos. En Fig. 5 se presenta el esquema de conexión utilizado.



**Fig. 5. Esquema de conexión del sistema de monitoreo/adquisición.**

Por otro lado, se utiliza una máquina de ensayos servo-hidráulica de la empresa “*MTS Systems*”. Esta máquina se caracteriza por su versatilidad y precisión en la realización de pruebas mecánicas en una amplia variedad de materiales y componentes. La Fig. 6 muestra una imagen de este tipo de equipo.



**Fig. 6. Máquina de ensayos de la serie LandMark. [3]**

Estos sistemas permiten llevar a cabo una diversidad de ensayos, como tracción, compresión, flexión y fatiga, entre otros. Para lo cual tiene software y hardware de control específico para la misma.

La máquina está equipada con sensores de fuerza y desplazamiento, lo que permite una medición precisa de las respuestas mecánicas de los materiales durante las pruebas. En particular, para este ensayo se utilizó la configuración mostrada en la Fig. 7.

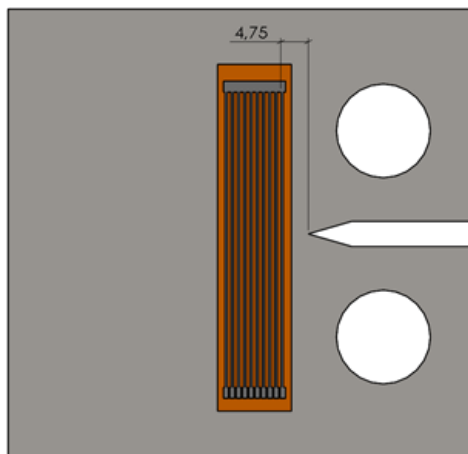


**Fig. 7. Máquina utilizada en nuestro ensayo.**

El software de control de la máquina permite definir los parámetros de ensayo como ser, amplitud de carga, forma de onda, frecuencia de aplicación de carga como también la realización de un ensayo con control por desplazamiento o por fuerza.

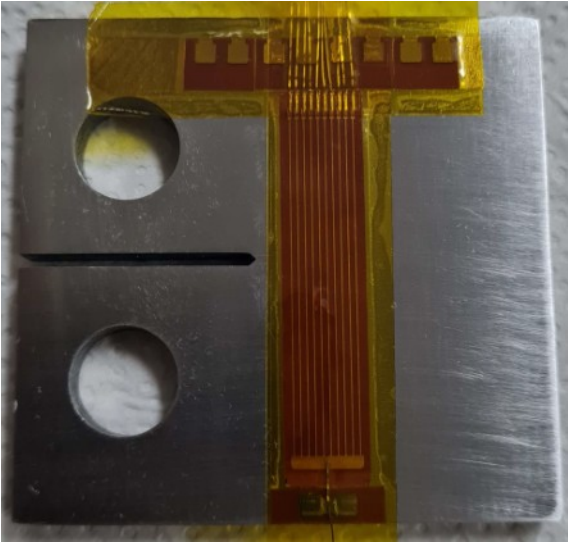
### *2.5 Realización del ensayo*

Para evaluar el desempeño de este tipo de sensores se realizó un ensayo, donde en la probeta denominada CT-UNaM-2, se instaló un *strain gauge* RDS a una distancia de 4,75 milímetros de la entalla, como se observa ilustrativamente en la Fig. 8.



**Fig. 8. Imagen ilustrativa de la instalación del sensor.**

Primeramente, se realizó la adecuación de la superficie siguiendo el procedimiento recomendado por el fabricante, seguido por el pegado del sensor en la cara que fue preparada previamente, como se puede observar en la Fig. 9.



**Fig. 9. Probeta instrumentada. sin conexionado.**

Luego, se procede a realizar el cableado conectando cada uno de los filamentos del sensor a un cable, Fig. 10, estos se enumeran del 1 al 10, iniciando desde el lado de la entalla y se detallan en la Tabla 2.

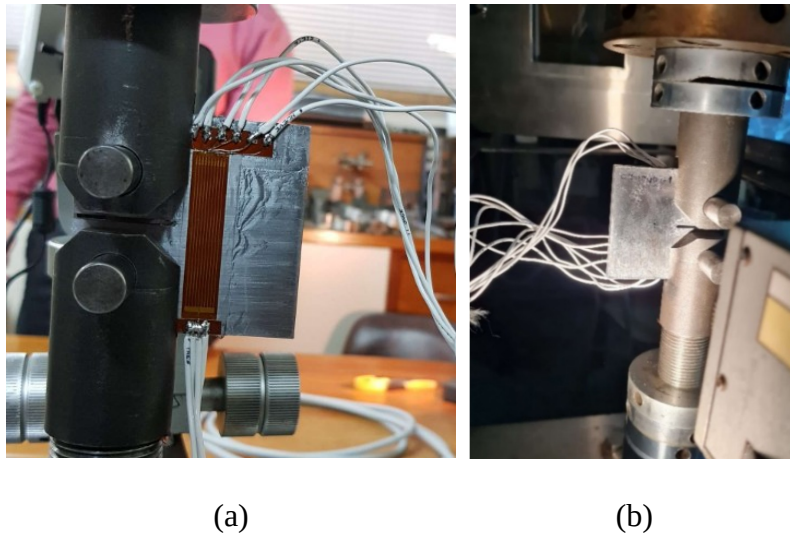


**Fig. 10. Probeta instrumentada. con conexionado.**

**Tabla 2. Filamentos conectados de los sensores.**

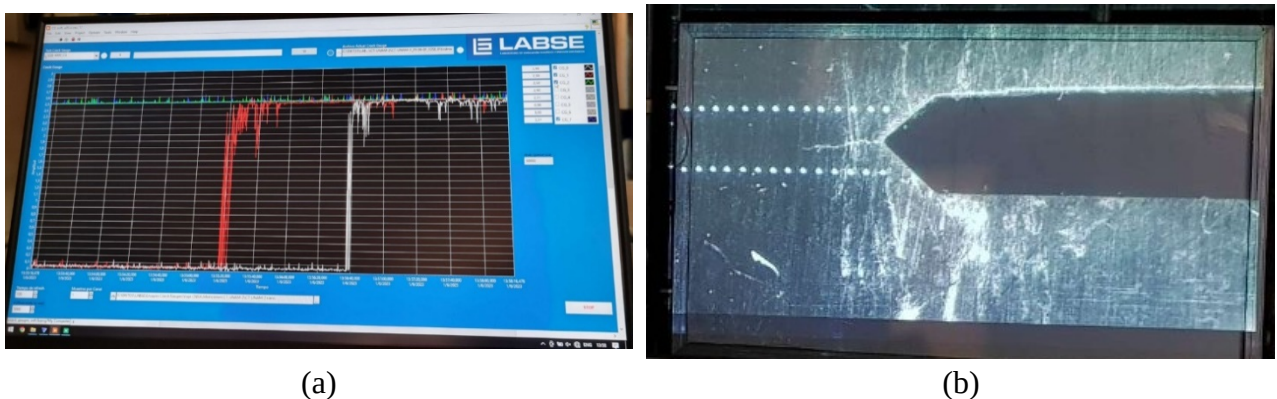
Probeta CT-UNaM-2	Filamentos conectados									
	1	2	3	4	5	6	8	10		

Luego la probeta se coloca en la maquina servo-hidráulica para realizar el ensayo, Fig. 11. Se aplica una carga alternante de 3.800 N a una frecuencia de 20 Hz y forma de onda senoidal. A medida que se realiza el ensayo se registra visualmente el avance de la fisura y éste a su vez se constata con los resultados obtenido en la medición.



**Fig. 11. Probeta montada en la máquina, (a) Vista Frente (b) Vista Posterior.**

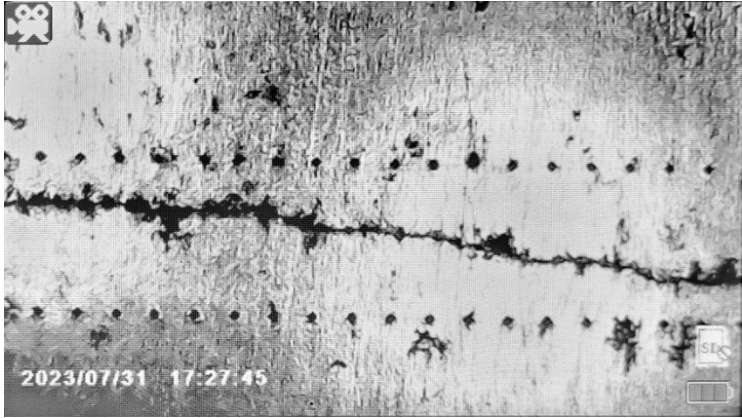
El registro visual se realiza por medio de una cámara, la cual estaba enfocada en la parte posterior de la probeta, cuya imagen se proyecta en una pantalla, con la cual se fue constatando el avance de la fisura con respecto a los datos obtenidos por el adquisidor los cuales, se observan en la computadora. ( )



**Fig. 12. Registro visual. (a) Pantalla del software de adquisición. (b) Proyección del avance de fisura obtenido por la cámara.**



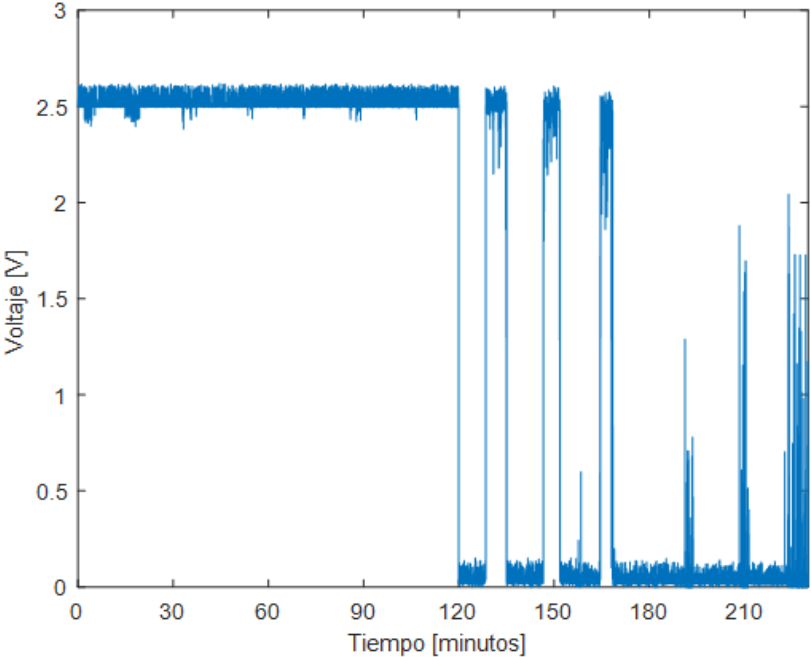
En la Fig. 13 se puede observar el avance de la fisura en la probeta C(T) ensayada. Además, en la misma, se observa puntos en la parte superior e inferior de la fisura, los mismos se encuentran a una distancia entre sí de 0,25 milímetros, y se utilizan para verificar la velocidad de avance de la falla durante el ensayo.



**Fig. 13. Visualización mediante microscopio de una fisura en una probeta C(T).**

*2.6 Resultados Obtenidos*

Los datos obtenidos durante el ensayo fueron adquiridos, procesados y graficados, en el caso de la señal del primer filamento, su gráfico se presenta en la Fig. 14 , se puede observar que el mismo tiene un valor de 2,5 desde el inicio del ensayo hasta aproximadamente los 120 minutos del inicio de la experiencia, donde el valor llega a 0 esto corresponde a la rotura del filamento de ese canal.



**Fig. 14. Señal en crudo de la adquisición del primer filamento.**

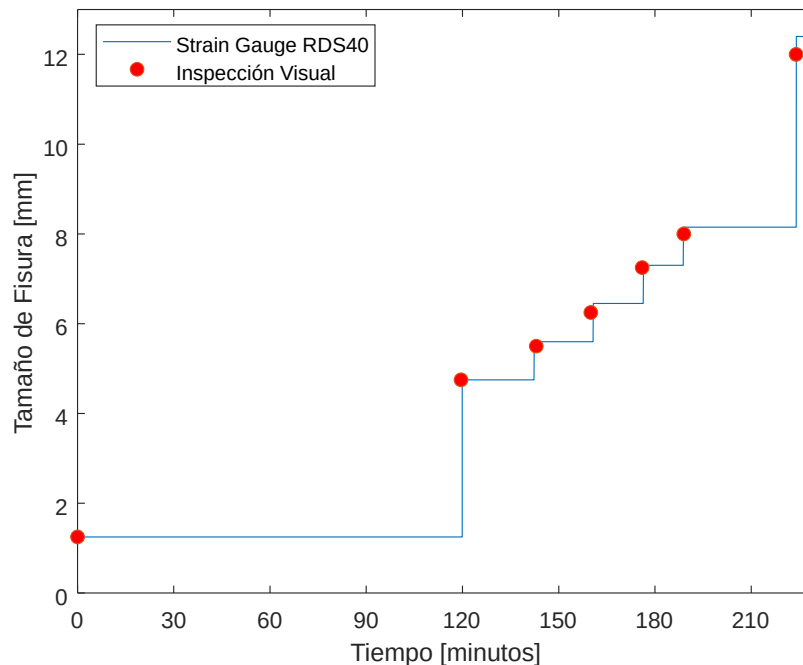
No obstante, se observa que la señal del mismo vuelve a presentar un valor de voltaje de 2,5 Volt en varias ocasiones, luego de que la fisura supere este primer filamento. Esto se debe a que las oscilaciones a las que está sometido el conjunto, la muestra más el sensor, pueden llegar a provocar que las dos partes del filamento vuelvan a hacer contacto entre sí, ya que la separación de la grieta ronda los 0,2 milímetros y ésta crece a medida que avanza la misma.

En la Tabla 3 se presenta el avance de fisura en función del tiempo, en este punto hay que tener en cuenta que la determinación de su tamaño se realiza mediante un conteo visual de puntos hasta los cuales el inicio de esta ha avanzado.

**Tabla 3. Avance de fisura en función del tiempo.**

Tiempo [minutos]	N° de Ciclos	N° punto	Tamaño [mm]
0	10000	5	1,25
120	141500	19	4,75
143	168000	22	5,5
160	190400	25	6,25
176	209200	29	7,25
189	224300	32	8
224	266600	48	12

Además, dado que la distancia entre filamentos del sensor instalado es de 0,85 milímetros, existe un desfase de detección entre este último y lo observado mediante los puntos guías, esto se puede ver en la Fig. 15.



**Fig. 15. Tamaño de fisura en función del tiempo.**

### 3. Conclusiones.

La realización de este ensayo ha confirmado de manera satisfactoria la eficacia operativa de los sensores Strain Gauge RDS en la detección del progreso de fisuras por fatiga. Esto respalda la validez de su implementación en componentes mecánicos que presenten fisuras iniciales. La utilización de estos sensores, junto con la capacidad de monitorear el avance de fisuras en elementos mecánicos, posibilita la planificación de intervenciones en el componente mientras se mantiene su operación normal, hasta que el aumento de la falla represente un riesgo significativo.

### 4. Referencias.

[1]	ASTM “ <i>Standard Test Method for Linear-Elastic Plane-Strain Fracture Toughness of Metallic Materials</i> ”, ASTM E399, 1999.
[2]	“ <i>Strain gauges RDS</i> ”, HBM, Alemania. [En línea]. Disponible: <a href="https://www.hbm.com/fileadmin/mediapool/hbmdoc/technical/S01265.pdf">https://www.hbm.com/fileadmin/mediapool/hbmdoc/technical/S01265.pdf</a> Consultado: junio, 2023
[3]	“ <i>Landmark® Servohydraulic Test Systems</i> ”. MTS. [En línea]. Disponible: <a href="https://www.mts.com/en/products/materials/dynamic-materials-test-systems/landmark-servohydraulic">https://www.mts.com/en/products/materials/dynamic-materials-test-systems/landmark-servohydraulic</a> . Consultado: agosto, 2023