

# Análisis de la emisión acústica producida en probetas de material compuesto reforzado con fibras de vidrio

## Analysis of the acoustic emission produced in glass-fibre-reinforced composite specimens

Presentación: 21/08/2024

### **Ernesto Gallo**

Departamento de Mecánica, Fac. Reg. Delta, Universidad Tecnológica Nacional (UTN), ARGENTINA.  
Grupo de Emisión Acústica y Departamento de Ingeniería Mecánica, Fac. Reg. Delta, UTN, ARGENTINA.  
[egallo@frd.utn.edu.ar](mailto:egallo@frd.utn.edu.ar)

### **Guido Ferrari**

Departamento de Mecánica, Fac. Reg. Delta, Universidad Tecnológica Nacional (UTN), ARGENTINA.  
Grupo de Emisión Acústica y Departamento de Ingeniería Mecánica, Fac. Reg. Delta, UTN, ARGENTINA.  
[gferrari@frd.utn.edu.ar](mailto:gferrari@frd.utn.edu.ar)

### **Martín Pedro Gómez**

Departamento de Mecánica, Fac. Reg. Delta, Universidad Tecnológica Nacional (UTN), ARGENTINA.  
Grupo de Emisión Acústica y Departamento de Ingeniería Mecánica, Fac. Reg. Delta, UTN, ARGENTINA.  
Dpto. ICES, GDType, GAIDI, CAC, Comisión Nacional de Energía Atómica, ARGENTINA.  
[mgomez@frd.utn.edu.ar](mailto:mgomez@frd.utn.edu.ar)

### **Resumen**

La Emisión Acústica (EA) es un método de Ensayo no-destrutivo (END) basado en la medición de ondas elásticas emitidas por fuentes intrínsecas al material cuando este es sometido a una sollicitación, lo que permite utilizarla para el análisis de componentes mecánicos.

En este trabajo se ensayaron probetas de resina polimérica reforzadas con fibra de vidrio. Así, se estudió la emisión EA generada por eventos que se producen por un deterioro dentro del material durante la aplicación de una carga, en este caso de manera secuencial. Las señales de EA medidas fueron parametrizadas y filtradas para identificar la información perteneciente a los diferentes procesos internos, y nivel de carga.

Se analizaron parámetros vinculados con la tasa de EA, correlacionados con los niveles carga mecánica. Los resultados muestran una diferencia en la tasa de emisión en niveles altos de carga, lo que indica la posibilidad de utilizar la metodología de END de EA en componentes de materiales compuestos para indicar su estado estructural en función de la carga.

**Palabras clave:** Materiales compuestos, Emisión acústica, Ensayos no destructivos

### **Abstract**

Acoustic Emission (AE) is a non-destructive testing (NDT) method based on the measurement of elastic waves emitted by intrinsic sources within the material when it is subjected to a load, allowing it to be used for the analysis of mechanical components. In this work, polymer resin specimens reinforced with fiberglass were tested. Thus, the AE emission generated by events that cause deterioration within the material during the sequential application of a load was studied. The AE signals were parameterized and filtered to identify the information pertaining to the different internal processes and load levels. Parameters related to the AE rate,

correlated with mechanical load levels, were analyzed. The results show a difference in the emission rate at high load levels, suggesting the use of the AE NDT methodology in composite material components to indicate their structural state as a function of the load.

**Keywords:** Composite materials, Acoustic emission, Non-destructive testing

## Introducción

Los materiales compuestos contienen múltiples factores que determinan su capacidad resistente como material estructural. Adicionalmente a las características de los componentes (matriz y refuerzo), las características morfológicas como la proporción de la mezcla, orientación de las láminas y su compactación son determinantes de las características mecánicas (Barbero, 2017: 108-146). Un material compuesto, sometido a algún tipo de sollicitación mecánica (tracción, compresión, corte, etc.) produce una diversidad de eventos mecánicos internos que generan ondas elásticas ultrasónicas y que pueden ser registradas por un sistema de Emisión Acústica (Gómez, 2012).

La Emisión Acústica (EA) es un método de Ensayo No Destructivo (END) que ha demostrado importante utilidad en el análisis de procesos de degradación y de validación del estado estructural de componentes fabricados con materiales compuestos (ASTM E 1067, E 1118, F 1430/F1430M, STP 1139). Estas normas aplican al control y a la generación de criterios de aceptación y rechazo, en tanques, tuberías y pértigas de material compuesto. La EA se entiende físicamente como la liberación de energía elástica en un corto intervalo de tiempo debido a una redistribución de tensiones dentro del material. Las fuentes de EA dentro de un material compuesto con fibra y matriz polimérica pueden ser la microfractura de la matriz, la delaminación de la fibra respecto de la matriz, el corte de fibra y otros procesos de degradación definidos en bibliografía para este tipo de material (Barbero, 2017: 230-273). La energía elástica liberada por la fuente puede ser captada por sensores piezoeléctricos que transducen las ondas elásticas en señales eléctricas. A su vez estas señales pueden ser amplificadas y posteriormente digitalizadas, procesadas y almacenadas para su estudio. Esto es realizado por el dispositivo denominado sistema de EA. Algunos criterios para evaluar el estado de un componente mediante EA, están basados en los efectos Kaiser y Felicity. Estos efectos relacionan los niveles de carga alcanzada por el material y el comienzo de la EA en esos diferentes niveles de carga, pudiendo dar indicaciones del grado de daño impuesto a un nivel a una carga determinada. Otros criterios están basados en la emisión de EA durante un periodo de carga constante en función del tiempo, debido a que los mecanismos de fractura y degradación en estos materiales no son instantáneos, sino que en general son tiempo dependiente y tienden a silenciarse, si la tensión es distribuida homogéneamente y no se activan más mecanismos de degradación. Mientras que si la EA se mantiene a lo largo del tiempo con carga constante indica que existen fuentes activas de degradación a ese nivel de carga. También existen criterios de selección de señales que se asocian a diferentes mecanismos de rotura en base a sus frecuencias, amplitudes y cantidades de energía emitida. Por ejemplo, el libro ASTM STP 1139 relaciona las emisiones entre 40-60 dB de amplitud máxima, con la fractura de la matriz, mientras que las amplitudes entre 60-80 dB y 80-100 dB están relacionadas con la delaminación y el corte de fibra, respectivamente.

A nivel experimental, dentro del grupo de Grupo de Emisión Acústica de la Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Delta de Campana, (GEA-UTN-FRD) se trabaja en la aplicación de la metodología de EA para la experimentación en materiales y estructuras, monitoreo de componentes y estructuras de material compuesto, procesamiento y análisis de las señales EA utilizadas para monitoreo (Gallo et.al. 2023). En el presente trabajo se muestran los resultados iniciales de procedimientos propios del GEA para ensayo de materiales compuestos y el análisis de la EA, producto de una sollicitación a flexión. Para esto se construyeron probetas de resina epoxi reforzado con fibra de vidrio. La geometría seleccionada es de placa plana de medidas (60 mm x 300 mm x 3 mm) y se ensayaron en un dispositivo hidráulico que permite realizar un ensayo de flexión en 3 puntos. Este sistema así armado se encontraba instrumentado mediante un equipo de EA que registra las señales pertenecientes al ensayo. Luego de realizar el análisis de la EA durante los pasos incrementales de sollicitación mecánica, se utilizó las cuentas acumuladas y la tasa en función del tiempo como parámetros indicativos a relacionar con el estado del material ensayado, a medida que la tensión se aproxima a la condición de rotura. Los resultados muestran que las cuentas de EA acumuladas en cargas superiores al 90 % de la carga de rotura, se multiplican en un factor de 10 a más veces. A su vez la tasa de EA muestra la actividad de las fuentes durante esos periodos. Esto establece información muy útil para idear procedimientos de ensayo con umbrales de sollicitación mecánica basados en señales de EA que se puedan relacionar con un estado de integridad estructural del material.

## Desarrollo

### Materiales

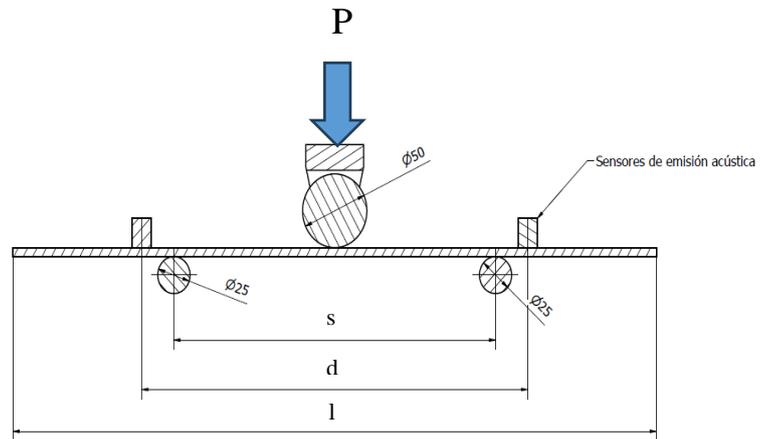
En los laboratorios del GEA, se fabricaron probetas laminadas de resina epoxi laminadas de forma manual, utilizando resina epoxi bicomponente DIPREG75 y fibra de vidrio unidireccional de 460 g/m<sup>2</sup>. Se aplicaron 10 capas de este tejido orientado de forma longitudinal a la probeta. Para obtener una mayor proporción de fibra, una vez laminadas las probetas se colocaron en una prensa previa a la gelificación de la resina y se aplicó presión entre las placas hasta finalizar el curado. Cada una de las probetas se recortó en un pantógrafo, con una fresa a una dimensión definitiva de 300 x 60 mm con espesores de entre 3 a 3,5 mm

### Dispositivo de flexión y adquisición de EA

Cada una de las probetas ensayadas fue sometida a ciclos incrementales de tensión aplicados en un sistema de flexión en tres puntos construido para tal fin en el GEA-UTN (Fig.1). Este dispositivo de flexión permite variar la distancia entre apoyos y aplicar la carga en el punto central de la probeta mediante un cilindro hidráulico accionado con una bomba manual. Una celda de carga situada en el émbolo del cilindro permite medir y posteriormente digitalizar la magnitud de la fuerza aplicada en todo momento para poder correlacionarla con las señales de EA.



a. Dispositivo de flexión.



b. Esquema de aplicación de cargas

Figura 1. Ensayo de flexión en 3 puntos.

Las medidas entre apoyos fueron de 150 mm (probeta A) y de 120 mm (probetas B y C). La tensión máxima promedio (1) en función de la sección de la probeta es proporcional a la carga central de tracción/compresión en el punto de aplicación de la carga, suponiendo un material homogéneo e isótropo:

$$\sigma_m = P \frac{3s}{2be^2} \quad (1)$$

La secuencia de carga escalonada, se diseñó para solicitar al material en niveles de carga incremental respecto de la Carga de Rotura (CR) de la pieza. No todos los ensayos tienen la misma cantidad de secuencias escalonadas. La información de EA utilizada para el análisis corresponde en todos los casos a los intervalos de 10 minutos de duración de los últimos dos ciclos de carga, para cada probeta, antes de llegar a la CR de la misma, como muestra el esquema de la fig. 2. En la tabla 1 se indican las características geométricas de cada una de las probetas, el incremento de la carga central en cada etapa de carga y cuanto incrementa esa carga la tensión en las fibras más solicitadas ( $\Delta P$  es el valor de los intervalos de carga y  $\Delta\sigma$  variación de la tensión máxima de la tensión en cada incremento).

## Sistema de EA

El sistema de EA utilizado fue un equipo de marca PAC (Physical Acoustic Corp.) de 4 canales modelo DISP 4 PCI, con sensores de banda ancha marca modelo WD y preamplificadores mod. 2/4/6 ajustados en 40 dB. La EA se adquirió en ambos modos de parámetros y formas de onda. También se realizó el posicionamiento de las fuentes de EA. Los filtros pasa alto y bajo utilizados fueron de 100 kHz a 1 MHz, respectivamente y los parámetros de EA adquiridos fueron: Amplitud máxima, cuentas, rms, duración, energía MARSE, Rise time además de parámetros de frecuencia y la carga de flexión aplicada a la probeta.

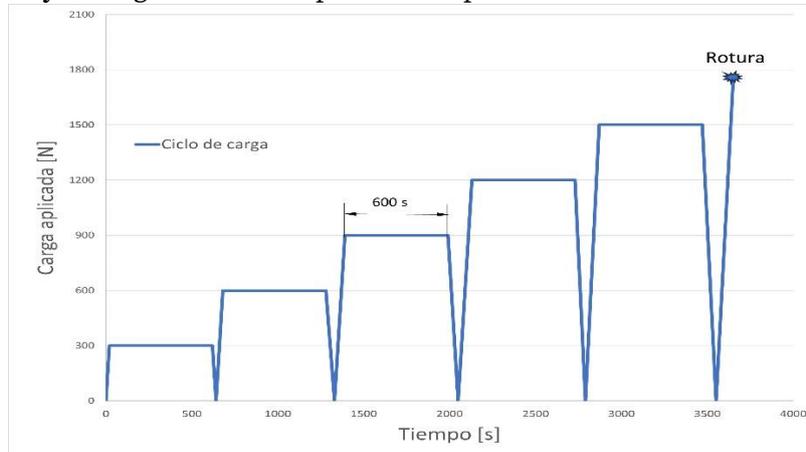


Figura 2. Esquema de la secuencia de carga de las probetas con intervalos de carga constante de 10 minutos de duración.

Tabla 1. Probetas de material compuesto.

| Geometría y configuración del ensayo* |         |     |     |            |                 |
|---------------------------------------|---------|-----|-----|------------|-----------------|
|                                       | l x b   | e   | s   | $\Delta P$ | $\Delta \sigma$ |
|                                       | mm x mm | mm  | mm  | N          | MPa             |
| A                                     | 300x60  | 3,5 | 150 | 400        | 122,4           |
| B                                     | 300x60  | 3   | 120 | 500        | 166,6           |
| C                                     | 300x60  | 3   | 120 | 400        | 133,3           |

## Análisis de la información

Se procesó la información paramétrica de EA asociada a los periodos de carga constante (10 minutos) durante la flexión aplicada sobre cada probeta. Si bien se analizaron varios de los parámetros de EA, en este trabajo se presenta un análisis de las cuentas de EA acumuladas en el tiempo y su tasa de emisión en función del tiempo. Los datos se filtraron en el rango de amplitudes de 40 a 60 dB. Con el objetivo de establecer un parámetro que permitiese cuantificar en el tiempo la variación de la actividad de las fuentes de emisión acústica. Se realizó la diferenciación numérica del parámetro cuentas de EA en función del tiempo, a fin de obtener la “tasa de emisión”, como el cociente de  $\Delta \text{cuentas} / \Delta t$ . Por lo tanto, se estableció que los valores de cuentas acumuladas se evalúan en períodos de tiempo constante de 1s, totalizando 600 períodos para los tramos de carga estacionaria de 10 min.

Cada uno de los hits de EA registrados con un número C de cuentas que se producen a un tiempo T se reemplazan por una curva de distribución normal con la forma:

$$dt = C_n \left( \frac{1}{10s \cdot \sqrt{2\pi}} \right) e^{-\frac{(t-T)^2}{(2 \cdot 10s)^2}} \quad (2)$$

De esta manera un escalón en la curva de cuentas acumuladas se traduce en la curva de cuentas acumuladas equivalentes en la integral de una distribución normal centrada en el instante en que se registra el Hit de EA con una varianza de 10 s modulada para que, al avanzar el registro, su contribución sea igual a la cantidad de cuentas de evento. Esta función permite identificar los perfiles de la emisividad de la EA y correlacionarlo los mecanismos de degradación en estos materiales que son dependientes del tiempo y del grado de daño.

## Resultados

En la figura 3 se muestran las gráficas de los resultados del parámetro cuentas acumuladas de EA para las probetas A, B y C, para las dos últimas secuencias de carga antes de llegar a la CR.

Para la probeta A, se observa un perfil de cuentas acumuladas de EA ya obtenido en trabajos anteriores (Gallo et al. 2024). Para las probetas B y C, la instancia de carga del 95% y 98% de CR respectivamente causan incrementos con pendiente positiva de emisión, lo que indica la acción de mecanismos de redistribución de tensiones que no se están estabilizando y decayendo en función del tiempo.

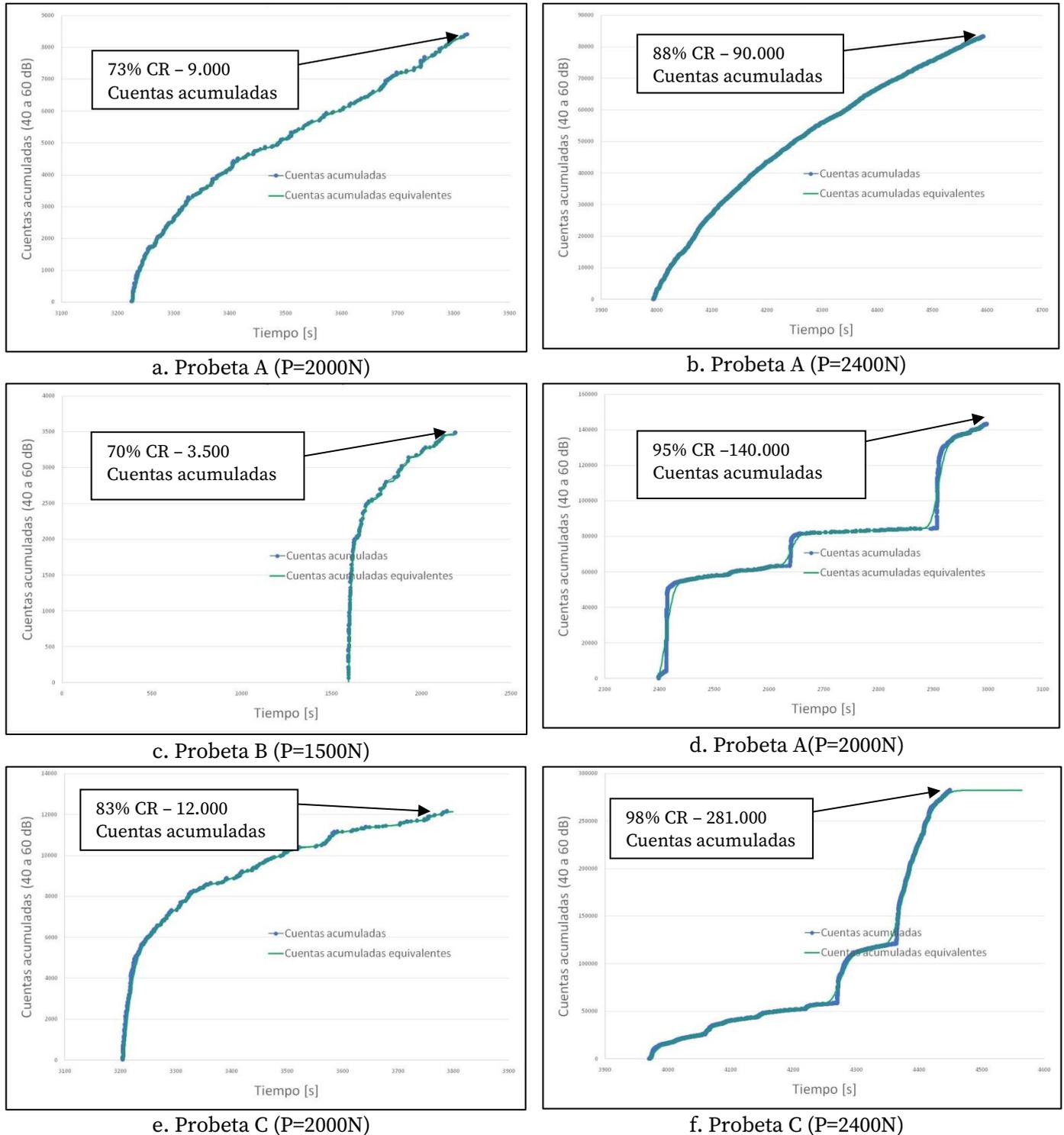


Figura 3. Cuentas acumuladas de EA para las probetas A, B y C evaluados en dos niveles de carga respecto de la CR.

En los tres casos A, B y C el periodo de carga del 88 al 98% de CR muestra un incremento en factores de 10 a 20 veces de emisión acumulada que para los periodos de carga del 70% al 83% de CR. En la Figura 4, se muestra la función de la tasa de emisión del parámetro de cuentas de AE para el estadio de carga más próximo a la CR. Estos perfiles muestran que durante los 600 s de esta secuencia de carga las probetas B y C desarrollaron instantes donde los mecanismos de degradación se replican de forma precipitada. La probeta A mostró una tasa de emisión estable.

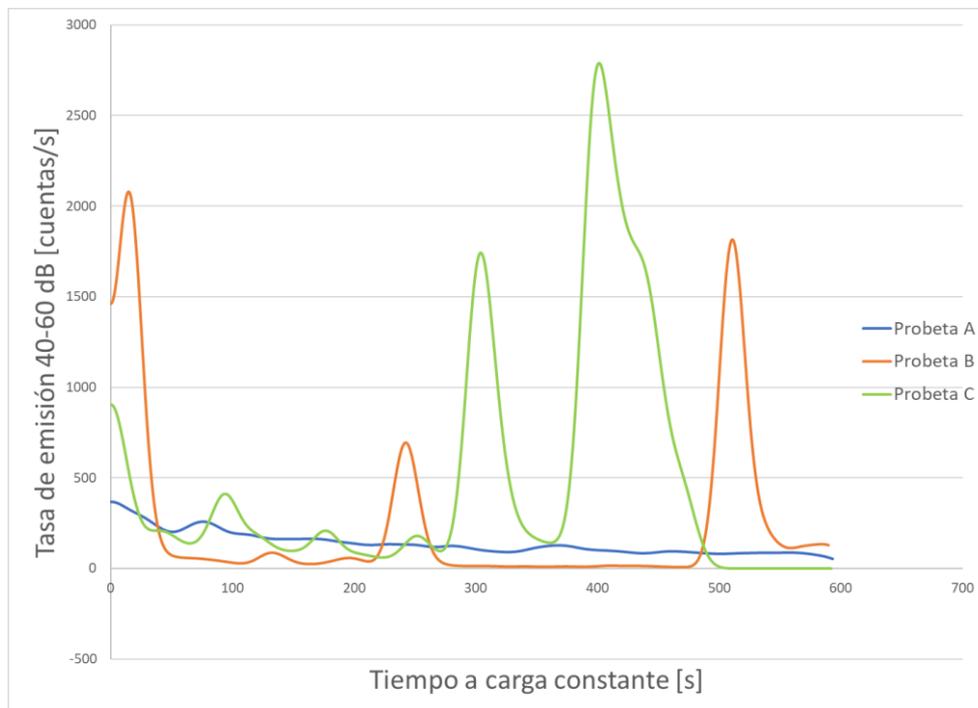


Figura 4. Tasa de Emisión de cuentas de EA para probetas A, B y C en estadio de carga más próximo a la CR.

## Conclusiones

Los niveles de señales de EA pertenecientes a mecanismos de deterioro del material en el rango de 40 a 60 dB se incrementan en factores de 10 a 20 veces para una sollicitación mecánica del 88% al 98% de la CR, respecto de la emisión para cargas en el rango entre 70% y 83% de la CR. Esto indica la aparición de significativos mecanismos de degradación asociados a un nivel de carga cercano a la CR. Los perfiles del cálculo de tasa de emisión del parámetro cuentas de EA muestran en algunos casos repentinos momentos de emisión, careciendo de una clara atenuación de la EA para los niveles más altos de carga. Este comportamiento diferente entre las probetas A respecto de B y C se puede atribuir al cambio de configuración de ensayo correspondiente a los puntos de apoyo de las probetas.

## Referencias

- ASTM E 1067 – 01 “Standard Practice for Acoustic Emission examination of Fiberglass Reinforced Plastic Resin (FRP) Tanks/Vessels”.
- ASTM E 1118 – 00 “Standard Practice for Acoustic Emission examination of Reinforced Thermosetting Resin Pipe”.
- ASTM F1430/F1430M – 15 “Standard Test Method for Acoustic Emission Testing of Insulated and Non-Insulated Aerial Personnel Devices with Supplemental Load Handling Attachments”.
- ASTM STP 1139 “Acoustic Emission Testing of Aerial Devices and Associated equipment Used in the Utility Industries”.
- M.P. Gómez. (2012) “Fundamentos de la Emisión Acústica”. CNEA – UTN FRD- UNSAM.
- Ever J. Barbero (2017), “Introduction to composite materials” CRC Press, Boca Raton.
- Gallo, E.A., Ferrari, G.C., Gomez, M.P., (2023) “Caracterización por emisión acústica de materiales compuestos PRFV sometidos a flexión”. CORENDE XIV