

CARACTERIZACIÓN DE FRACTURAS DE ROCAS BASALTICAS A PARTIR DE LA DETECCIÓN DE EMISIÓN ACÚSTICA

Alejandra Vesga-Ramírez ^{ab}, M. Eduardo Zitto ^c, Dino Filipussi ^{ad}, Emilio Camilion ^e,
Rosa Piotrkowski ^{cf}, Martín Gómez ^{ab}

^a Grupo de Ondas Elásticas, ICES, Centro Atómico Constituyentes, CNEA, ARGENTINA

^b Grupo de Emisión Acústica, FRD, Universidad Tecnológica Nacional, ARGENTINA

^c Departamento de Matemática, FIUBA, Universidad de Buenos Aires, ARGENTINA

^d Departamento de Física, ECyT-UNSAM, Universidad Nacional de San Martín, ARGENTINA

^e YPF-Tecnología, La Plata, ARGENTINA

^f ITECA UNSAM-CONICET, Centro de Matemática Aplicada, ECyT-UNSAM,

Universidad Nacional de San Martín, ARGENTINA

e-mail: alejandravesga@cnea.gov.ar

RESUMEN

Las rocas circundantes de macizos rocosos bajo tensión tales como túneles en montañas, paredes de roca en pozos de perforación petrolera o en volcanes están generalmente sometidas a diferentes condiciones de esfuerzos, entre estos de compresión. Por tanto, estudiar las propiedades de rotura de las rocas bajo diferentes condiciones de esfuerzos es de gran importancia para comprender los mecanismos de fractura y realizar predicciones de fallos en rocas sometidas a compresión. La detección de Emisión Acústica (EA) es un método de ensayo no destructivo (END) que sirve para comprender y estudiar las ondas acústicas que se generan cuando un material está sometido a una sollicitación. Detectar esta EA es una herramienta para entender las discontinuidades presentes en un material, así como la base para determinar áreas potenciales de inestabilidad como efecto de la activación y/o reactivación de fracturas/fallas, propagación de fracturas y nucleación de microfracturas. Este trabajo presenta los resultados de la adquisición de las señales recibidas de EA en un ensayo de compresión uniaxial de una roca tipo Basalto, proveniente del volcán Peteroa en Argentina. La roca se sometió a diferentes estados de tensión hasta llegar a la rotura. Se analizaron los eventos de EA registrados, por medio de los parámetros clásicos de Emisión Acústica más representativos para evaluar el proceso de fractura de la roca. También se usaron parámetros secundarios de la EA para realizar una clasificación de los modos de fractura, indicando en qué situaciones predominaban el modo ténsil o el de corte para los diferentes estados de tensión a lo largo del ensayo.

Palabras Clave: Emisión Acústica, Basalto, Peteroa, Fractura Tensil, Fractura Corte.

INTRODUCCIÓN

La Emisión Acústica (EA) es un fenómeno ampliamente estudiado que ocurre cuando un material libera energía en forma de ondas elásticas en respuesta a una sollicitación (Ono,2011; Calabrese,2020; Cassals,2021). Estas ondas, generadas por una fuente de EA pueden ser atribuidas a formación de microfracturas, reactivación de fracturas, la propagación de fracturas entre otras (Carrasco,2021; Zhao, 2022; Li, 2022; Niu,2023) Diversas investigaciones utilizando la EA han permitido un mayor entendimiento de los

procesos de formación, crecimiento y predicción de daños en una variedad de materiales y rocas (Rodríguez,2019; Zhang,2021; Dong,2023, Cao,2023)

Asimismo, los avances en el estudio de la EA han llevado a la aplicación de esta técnica en áreas de investigación adicionales. Recientemente, se ha empleado la detección de EA para analizar fracturas inducidas por cambios en la presión del fluido en los poros y la inyección de fluidos (Wu; 2022; Shi,2023) Estos hallazgos han ampliado las posibilidades de la EA y han proporcionado nuevos conocimientos sobre la respuesta de los materiales ante diferentes estímulos.

En este contexto, el presente estudio se propone investigar las características mecánicas y las propiedades de la Emisión Acústica (EA) en ensayos de compresión de rocas, bajo condiciones variables de carga. El conocimiento obtenido a partir de esta investigación contribuirá a una mejor comprensión de los mecanismos de fractura y a la predicción de fallas en rocas sometidas a compresión. Este conocimiento resulta especialmente relevante en áreas donde las rocas circundantes a estructuras geológicas y geotécnicas críticas, como túneles en montañas, paredes de pozos petroleros o volcanes, están sujetas a diferentes condiciones de esfuerzo.

FUNDAMENTOS TEÓRICOS

Principio de detección de Emisión Acústica

Para detectar la EA, se utilizan sensores o transductores que se colocan en la superficie del material que se va a inspeccionar. Estos dispositivos están diseñados para capturar las ondas sonoras generadas por el material durante su funcionamiento normal o cuando se somete a cargas o cambios en su estado. Estas ondas son convertidas en señal eléctrica por el sensor, y amplificadas por el preamplificador, llegando a una computadora que las procesará y registrará, ver Fig. 1.

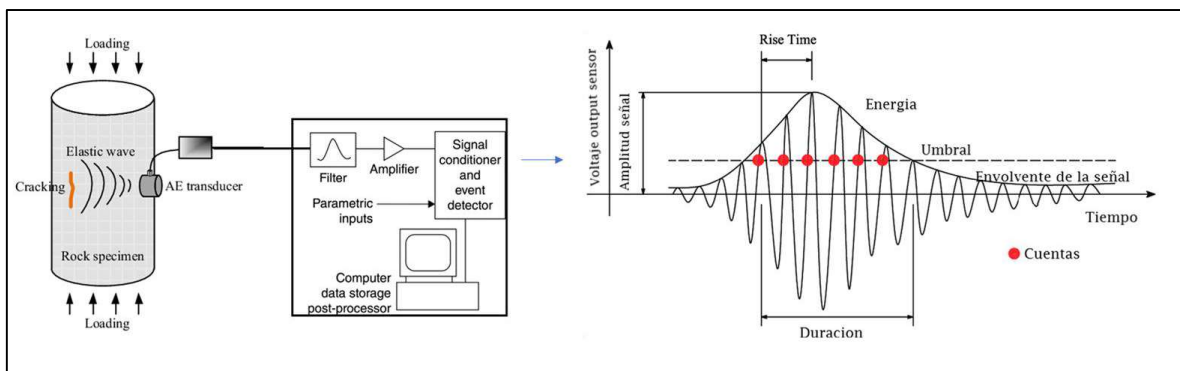


Figura 1. Principio de detección de EA y parámetros típicos de la señal de EA recibida.

Entre los parámetros extraídos se encuentran la Amplitud, que indica la magnitud máxima alcanzada por la señal de EA, el Rise Time (RA), que describe la rapidez con la que se alcanza la amplitud máxima desde el inicio del evento, y la frecuencia media (FM), que representa el valor promedio de la frecuencia de las ondas acústicas generadas durante el evento. Así mismo se registra la duración del evento, que indica el intervalo de tiempo durante el cual se detectaron las ondas acústicas, la energía total liberada, cuentas, entre otros.

Clasificación de modos de fractura a partir de EA

La clasificación de los eventos de Emisión Acústica (EA) desempeña un papel crucial en el análisis de este fenómeno. Una técnica comúnmente utilizada para clasificar estos eventos se basa en el gráfico FM vs RA (Jiao,2019; Maji,2021, Wang,2021)

El gráfico FM vs RA es una representación visual que permite evaluar y distinguir diferentes modos de fractura en los eventos de EA. FM a la frecuencia media. RA (Ratio Amplitud por sus siglas en inglés) es una medida que compara las amplitudes de las ondas compresionales y de corte presentes en el evento, ver Fig. 2.

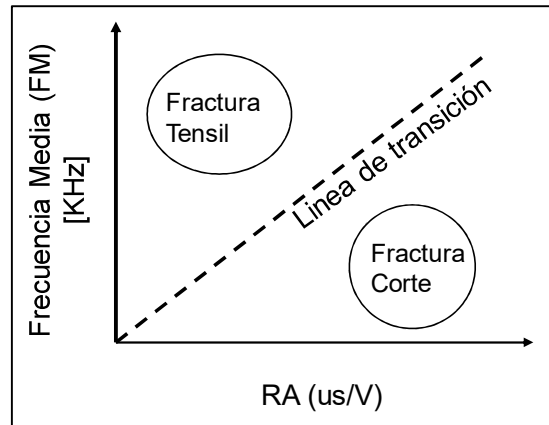


Figura 2. Diagrama esquemático del gráfico de Frecuencia Media (FM) vs RA para discriminar la fractura tipo tensil y corte.

En este gráfico, los eventos de EA se representan como puntos, donde el eje FM representa la relación entre las amplitudes de las ondas compresionales y de corte, mientras que el eje RA indica la amplitud total del evento. Al interpretar la posición de los puntos en el gráfico, es posible clasificar los eventos en diferentes categorías de fractura.

El parámetro Frecuencia Media (FM) se obtiene a partir del cociente entre los parámetros Cuentas/Duración.

$$FM = \frac{Cuentas}{Duración} = unidades en kHz$$

El parámetro RA se obtiene a partir del cociente entre los parámetros RiseTime/Amplitud

$$RA = \frac{RiseTime [us]}{Amplitud [V]} = unidades en us/V$$

Por ejemplo, los eventos ubicados en una región cercana al origen del gráfico, con una relación FM baja y una amplitud total RA relativamente alta, suelen corresponder a eventos de fractura de tipo tensión. Por otro lado, los eventos situados en una región con una relación FM alta y una amplitud total RA moderada, suelen asociarse con eventos de fractura de tipo corte.

DESARROLLO EXPERIMENTAL

La muestra de basalto fue ensayada a compresión simple uniaxial llevándola a la rotura. Se utilizó un sistema de carga mecánica con capacidad de carga máxima de 440 kN. Los datos de EA registrados en este trabajo fueron adquiridos con un equipo de EA marca PAC de dos canales y se midieron los parámetros de EA durante la carga.

Para la adquisición de las señales de EA se utilizaron dos equipos, uno marca Applied Seismology Consulting con cuatro sensores tipo VS150-M de Vallen System. Su respuesta de frecuencia se caracteriza por un pico a 150 kHz donde exhibe una resonancia. El segundo equipo marca PAC con dos canales fue utilizado para el monitoreo de los parámetros de EA durante la carga. Las señales de EA fueron amplificadas con un amplificador de 40 dB, filtradas por un filtro pasa bajo de 20 kHz y un filtro pasa alto de 1 MHz. Una frecuencia de 5000 muestras por segundo fue usada. El umbral de detección fue fijado en un valor de 42 dB basado en el ruido ambiental. Los parámetros de la señal digital y los datos se almacenaron continuamente en el buffer y luego se transmitieron al ordenador para su posterior procesamiento. El diagrama esquemático y las fotos del equipo del sistema de adquisición se ilustran en la Fig. 3.

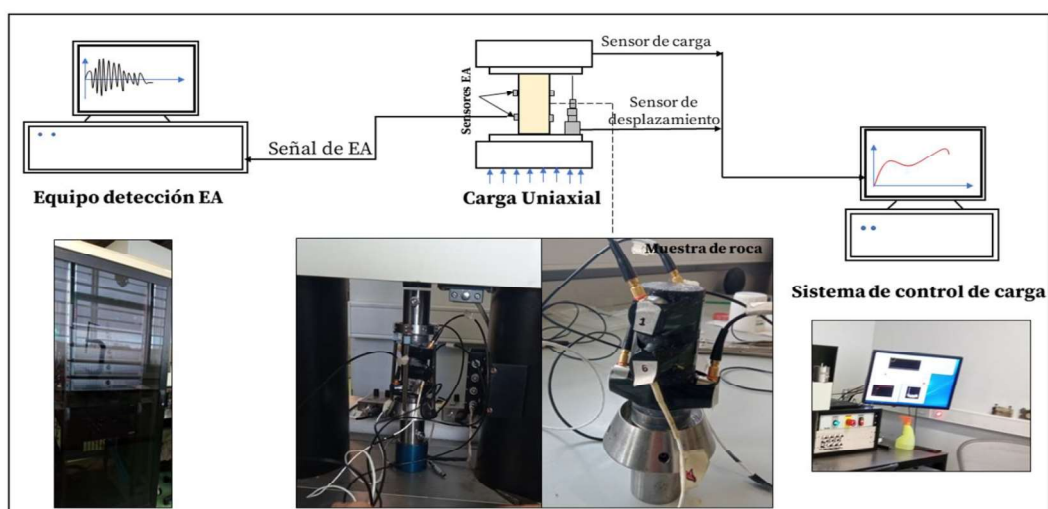


Figura 3. Diseño experimental para la adquisición de señales de Emisión Acústica durante el ensayo de rotura de roca controlado por carga uniaxial

RESULTADOS

Durante el ensayo, se registraron un total de 245.084 señales en los canales 1 y 2. Para facilitar el análisis, se aplicó un filtro de amplitud de 50 dB para identificar los posibles eventos asociados a la Emisión Acústica (EA). Como resultado de este filtro, se identificaron 30.244 hits que se consideraron como eventos potenciales de EA.

A continuación, se presenta el análisis de post-procesamiento en estos eventos para investigar los parámetros más representativos. Estos parámetros fueron seleccionados debido a su capacidad para mostrar variabilidad a medida que la roca se acerca a la etapa de rotura durante el ensayo.

Amplitud

Este parámetro se refiere al valor máximo valor de amplitud de la señal de EA para cada hit. Se representa en dB. En la figura 3 se observan las amplitudes registradas en cada sensor para cada evento de EA detectado. El momento de la rotura de la probeta o de la propagación inestable de la fisura se da en coincidencia con la máxima fuerza aplicada. Al superponer en el gráfico de la curva de aplicación de la Fuerza sobre la probeta se observa cómo el valor de la amplitud de los hits de EA va aumentando correlacionado con el aumento de la fuerza, y así mismo se observa como disminuye la cantidad de hits registrados de EA cuando la fuerza se mantiene constante, ver Fig. 4.

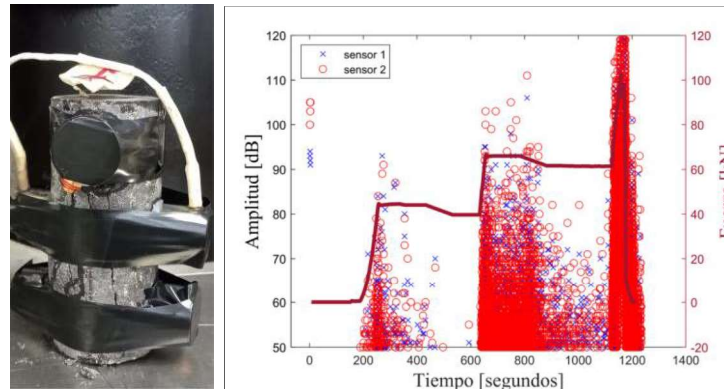


Figura 4. Fuerza aplicada sobre la roca (línea roja) y amplitud de los hits de EA (marcador azul y rojo) registrados en el ensayo en función del tiempo.

Hits acumulados vs Tiempo

El tiempo de ocurrencia ('hit time') se refiere al tiempo en el cual se considera que comienza un evento de EA. Esto ocurre cuando la señal de cada hit supera por primera vez el umbral. En la Fig. 5 se muestran los hits acumulados (la suma acumulada de los hits a lo largo del tiempo) de los dos canales de adquisición. Se observa su relación en función de la fuerza aplicada. Los hits acumulados no muestran con tanto detalle los momentos de avance de las fisuras, pero si la forma exponencial creciente de la curva entre los 1000 y los 1100 segundos sería un indicio de un fenómeno de daño incremental sobre el material hasta su fase final entre los 1100 y los 1200 segundos.

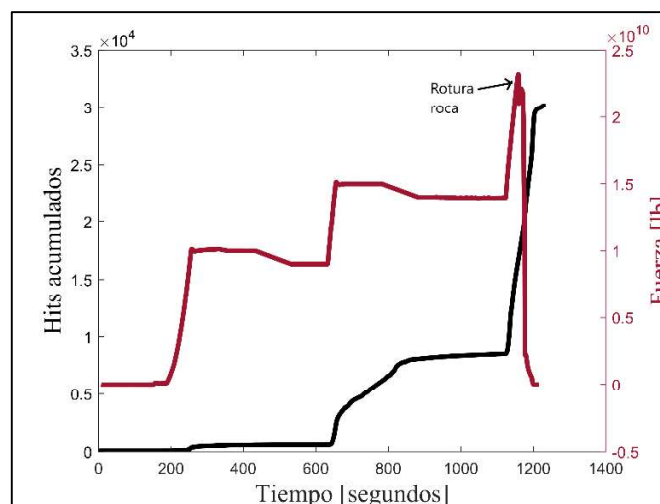


Figura 5. Hits acumulados en función del tiempo

Cuentas

El parámetro número de cuentas se refiere al número de veces que la amplitud de una señal excede un cierto umbral de voltaje predefinido para cada hit de EA. En la figura 6 de la izquierda se observa el número de cuentas registrados para cada canal de EA en función del tiempo de ensayo. En la Fig. 6 derecha se muestra la cantidad de cuentas acumuladas, superpuesta a la curva de fuerza aplicada durante el ensayo. A partir de aproximadamente los 600 segundos las cuentas acumuladas de EA muestran un incremento en forma de escalones, compatibles, según estudios de EA en la literatura, con la aparición y crecimiento de fisuras dentro de la probeta de roca. Luego aproximadamente a los 1100 segundos donde se produce el mayor salto en las cuentas acumuladas correspondiéndose a la rotura final y coincidente con la máxima fuerza aplicada a la roca.

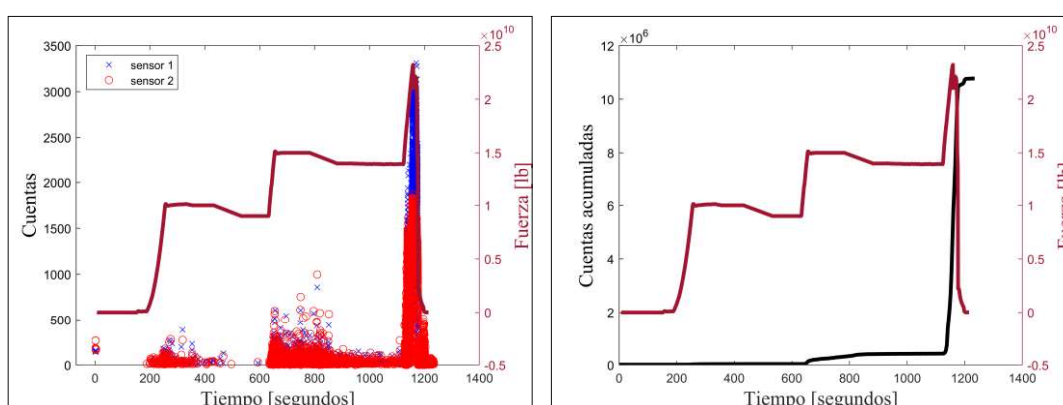


Figura 6. A la izquierda las cuentas registradas por cada sensor en función del tiempo. A la derecha las cuentas acumuladas de los dos sensores. La línea roja representa la curva de fuerza aplicada en el ensayo

Energía

Este parámetro se define como el área bajo la envolvente de la señal de EA. En la Fig.7 se observa como la Energía acumulada aumenta notoriamente al final del ensayo cuando se produce la fractura de la probeta. La Fig. 7 muestra como la Energía acumulada aumenta cerca del límite de la Fuerza máxima aplicada. Se observa también que si bien, en este caso, este parámetro es sensible a los procesos de deterioro gradual, lo es en menor grado que las cuentas acumuladas.

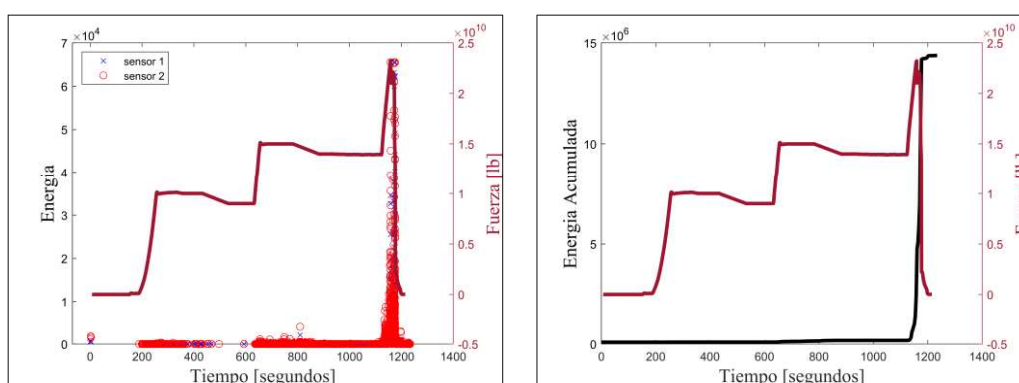


Figura 7. A la izquierda la energía recibida por los dos canales en función del tiempo y a la derecha la energía acumulada por todos los sensores en función del tiempo.

Fractura tipo tensil o corte

A continuación, se presentan los intervalos de tiempo correspondientes a las distintas etapas del ensayo, junto con el análisis respectivo de los resultados obtenidos. Durante cada intervalo, se examinaron las tendencias de los parámetros secundarios RA y FM para determinar los modos de ruptura predominantes (tensil o corte).

Intervalo 1 (155-257 s)-Aumentó la carga

En este intervalo registraron un total de 297 hits, con 120 hits de EA detectados en el canal 1 y 177 hits de EA en el canal 2. En este intervalo la carga aplicada a la muestra de roca basáltica aumenta por primera vez hasta 40 kN. La Fig. 8 ilustra la amplitud máxima de los eventos identificados en el canal 1, así como la clasificación de los hits en términos de modos de fractura tipo tensión o cizalla, basándose en el gráfico FM vs RA. De los 120 eventos registrados en el canal 1, se identificaron 91 como eventos de tipo tensión, mientras que 29 fueron clasificados como eventos de tipo corte.

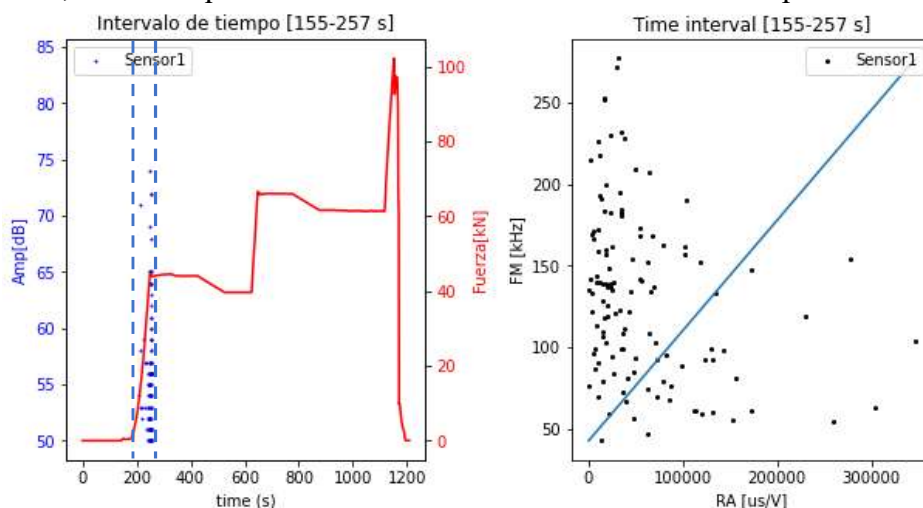


Figura 8. A la izquierda los eventos de EA detectados en el intervalo de tiempo 155-257 s en función de su amplitud. En rojo se observa la carga aplicada a la roca. A la derecha se observa los parámetros FM vs RA donde se expone los modos de ruptura predominantes (Tensil o Corte).

Intervalo 2 (257-633s)-Carga constante y disminuyó

En este intervalo la carga se mantuvo en modo constante y disminuyó en el último tramo. Se registraron un total de 223 hits, con 106 hits de EA detectados en el canal 1 y 177 hits de EA en el canal 2. La Fig. 9 ilustra la amplitud máxima de los eventos identificados en el canal 1, así como la clasificación de los hits en términos de modos de fractura tipo tensión o cizalla, basándose en el gráfico FM vs RA. De los 106 hits registrados en el canal 1, se identificaron 96 como eventos de tipo tensión, mientras que 10 fueron clasificados como eventos de tipo corte.

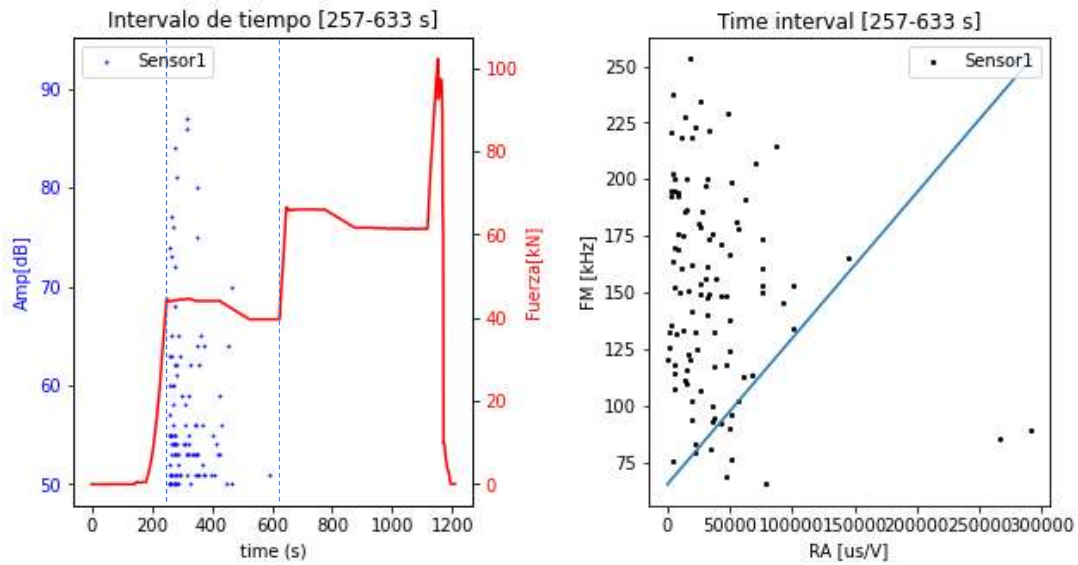


Figura 9. A la izquierda los eventos de EA detectados en el intervalo de tiempo 257-633 s en función de su amplitud. En rojo se observa la carga aplicada a la roca. A la derecha se observa los parámetros FM vs RA donde se expone los modos de ruptura predominantes (Tensil o Corte).

Intervalo3 (633-657s)-Carga aumentó

En este intervalo la carga aplicada a la muestra de roca basáltica aumenta por segunda vez hasta 65 kN. Se identificaron 2002 hits entre canal 1 (909 eventos de EA) y canal 2 (1093 eventos de EA). La figura 10 muestra la amplitud máxima de los eventos detectados en el canal 1 y los eventos clasificados con modo fractura tipo tensil o cizalla en función del gráfico FM vs RA. De los 909 eventos del canal 1, 742 fueron clasificados tipo tensil y 167 de tipo cizalla.

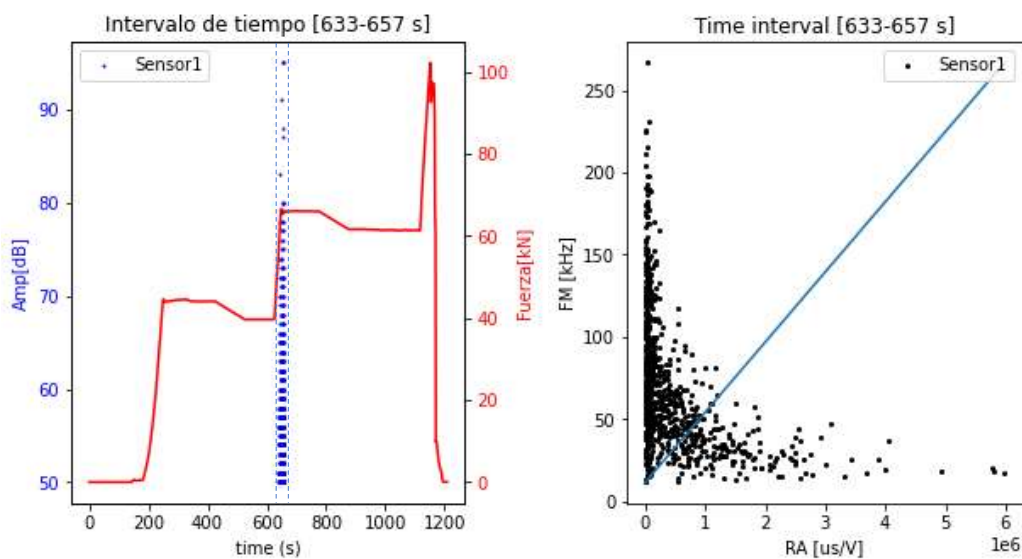


Figura 10. A la izquierda los eventos de EA detectados en el intervalo de tiempo 633-657s en función de su amplitud. En rojo se observa la carga aplicada a la roca. A la derecha se observa los parámetros FM vs RA donde se expone los modos de ruptura predominantes (Tensil o Corte).

Intervalo 4 (657-1122s) --Carga constante-disminuyo

En este intervalo la carga se mantuvo en modo constante, disminuyo y luego volvió a mantenerse constante en el último tramo. Se identificaron 5924 eventos entre canal 1 (2417 eventos de EA) y canal 2 (3507 eventos de EA). La Fig. 11 muestra la amplitud máxima de los eventos detectados en el canal 1 y los eventos clasificados con fractura tipo tensil o cizalla en función del gráfico FM vs RA. De los 2417 eventos del canal 1, 2263 fueron clasificados tipo tensil y 154 de tipo cizalla.

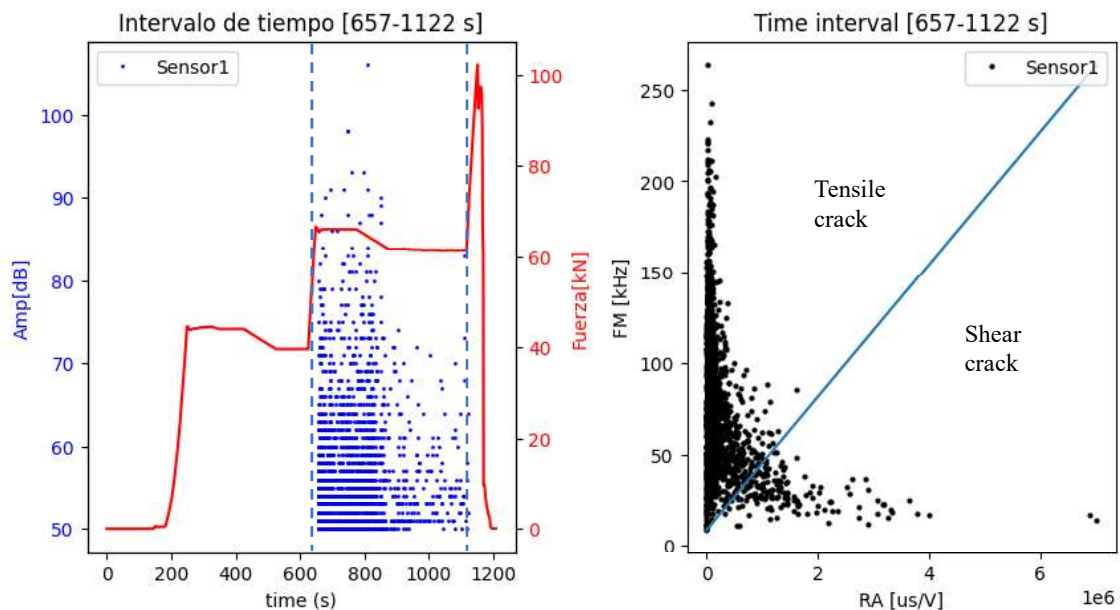


Figura 11. A la izquierda los eventos de EA detectados en el intervalo de tiempo 657-1122s en función de su amplitud. En rojo se observa la carga aplicada a la roca. A la derecha se observa los parámetros FM vs RA donde se expone los modos de ruptura predominantes (Tensil o Corte)

Intervalo 5 (1122-1230s)-Carga aumentó

En este intervalo, la carga aplicada a la muestra de roca basáltica aumenta por tercera vez, desde 62 kN hasta 110 kN, momento en el que se produce la rotura de la roca. Se identificaron 21682 eventos entre canal 1(10029 eventos de EA) y canal 2 (11653 eventos de EA). La Fig. 12 muestra la amplitud máxima de los eventos detectados en el canal 1 y los eventos clasificados en tensil o cizalla en función del gráfico FM vs RA. De los 10029 eventos del canal 1, 8595 fueron clasificados tipo tensil y 1434 de tipo corte

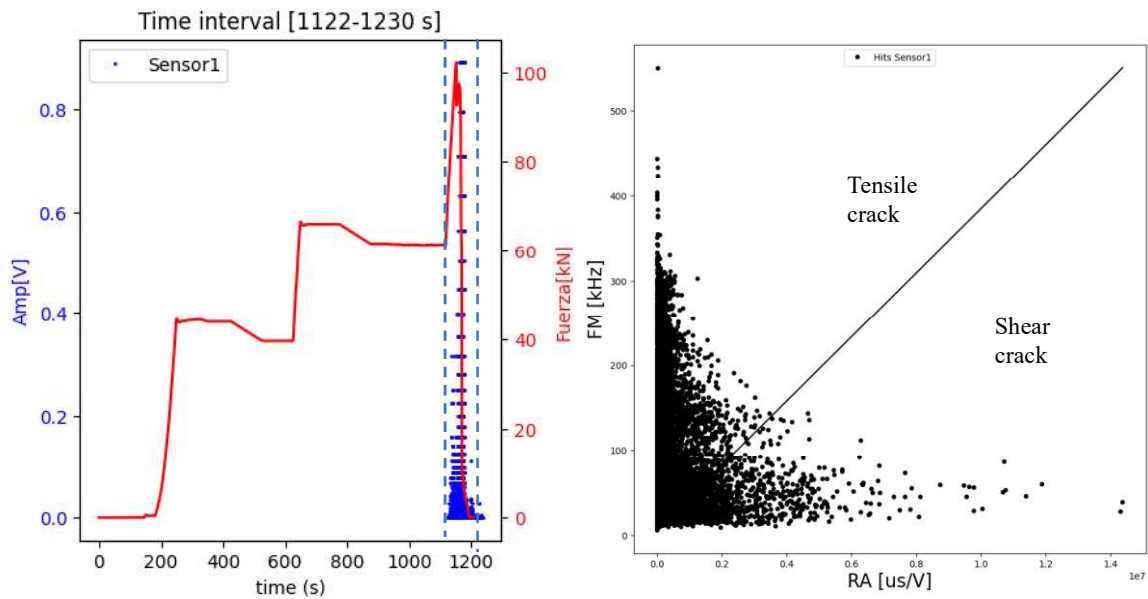


Figura 12. A la izquierda los eventos de EA detectados en el intervalo de tiempo 1122-1230s en función de su amplitud. En rojo se observa la carga aplicada a la roca. A la derecha se observa los parámetros FM vs RA donde se expone los modos de ruptura predominantes (Tensil o Corte).

CONCLUSIONES

Se hizo un ensayo de compresión Uniaxial con roca basáltica hasta llevar a la rotura. Se detectaron las señales de Emisión Acústica, los parámetros más representativos para evaluar el daño fueron la Amplitud, los Hits acumulados, las cuentas y Energía.

Se puede observar un aumento de la tasa de EA a partir de 620 s vinculado a microfisuración roca. Se observa una disminución de la tasa de eventos de EA cuando la fuerza permanece constante. En la etapa final de rotura se observa un aumento de la EA asociada al modo de fractura de corte.

REFERENCIAS

- Calabrese, L., & Proverbio, E. (2020). A review on the applications of acoustic emission technique in the study of stress corrosion cracking. *Corrosion and Materials Degradation*, 2(1), 1-30.
- Cao, K., Xu, Y., Khan, N. M., Li, X., Cui, R., Hussain, S., ... & Alarif, S. S. (2023). A comprehensive model for evaluating infrared radiation and acoustic emission characteristics of sandstone fracture. *Engineering Fracture Mechanics*, 283, 109217.
- Casals, B., Dahmen, K. A., Gou, B., Rooke, S., & Salje, E. K. (2021). The duration-energy-size enigma for acoustic emission. *Scientific reports*, 11(1), 5590.
- Carrasco, Á., Méndez, F., Leaman, F., & Molina Vicuña, C. (2021). Short review of the use of acoustic emissions for detection and monitoring of cracks. *Acoustics Australia*, 49, 273-280.
- Dong, L., Chen, Y., Sun, D., Zhang, Y., & Deng, S. (2023). Implications for identification of principal stress directions from acoustic emission characteristics of granite under biaxial compression experiments. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 15(4), 852-863.
- Rodríguez, P., & Celestino, T. B. (2019). Application of acoustic emission monitoring and signal analysis to the qualitative and quantitative characterization of the fracturing process in rocks. *Engineering Fracture Mechanics*, 210, 54-69.

- Ono, K. (2011). ACOUSTIC EMISSION IN MATERIALS RESEARCH-A REVIEW. *Journal of acoustic emission*, 29.
- Niu, Y., Hu, Y. J., & Wang, J. G. (2023). Cracking characteristics and damage assessment of filled rocks using acoustic emission technology. *International Journal of Geomechanics*, 23(4), 04023013.
- Li, Q., Qian, Y., Hu, Q., Jiang, Z., Xu, Y., Shang, X., ... & Li, W. (2022). Acoustic Emission Response Mechanism of Hydraulic Fracturing in Different Coal and Rock: A Laboratory Study. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 55(8), 4657-4672.
- Jiao, Y., Zhang, Y., Zhang, M., Fu, L., & Zhang, L. (2019). Investigation of fracture modes in pervious asphalt under splitting and compression based on acoustic emission monitoring. *Engineering Fracture Mechanics*, 211, 209-220.
- Shi, X., Xu, H., Che, M., Xiao, C., Ni, H., & Gao, Q. (2023). Investigations of fracture behavior and pore structure change in pulse fracturing for cement block. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 166, 105366.
- Wang, T., Wang, L., Xue, F., & Xue, M. (2021). Identification of crack development in granite under triaxial compression based on the acoustic emission signal. *International Journal of Distributed Sensor Networks*, 17(1), 1550147720986116.
- Wu, S., Qin, G., & Cao, J. (2022). Deformation, Failure, and Acoustic Emission Characteristics under Different Lithological Confining Pressures. *Materials*, 15(12), 4257.
- Zhao, S., Chao, Q., Yang, L., Qin, K., & Zuo, J. (2022). A Review on Application of Acoustic Emission in Coal—Analysis Based on CiteSpace Knowledge Network. *Processes*, 10(11), 2397.
- Zhang, Z., Liu, X., Zhang, Y., Qin, X., & Khan, M. (2021). Comparative study on fracture characteristics of coal and rock samples based on acoustic emission technology. *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*, 111, 102851.