



# IV CAIM 2014

Cuarto Congreso Argentino de Ingeniería Mecánica



UNIVERSIDAD NACIONAL DEL NORDESTE  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
Resistencia Chaco - Rep. Argentina

FORO  
DOCENTE  
DEL ÁREA  
MECÁNICA  
DE LAS  
INGENIERÍAS

FoDAMI

## EMPLEO DE EMISIÓN ACÚSTICA PARA LA INSPECCION DE CÁSCARAS CERÁMICAS DE FUNDICIÓN DE PRECISIÓN

Pablo Gerardo Varela <sup>\*1</sup>, Martín A. Kunusch Micone <sup>1</sup>, Nicolás Ponso <sup>1</sup>, Leonardo Molisani <sup>1</sup>

<sup>1</sup> Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de Río Cuarto  
Ruta Nac. 36 km. 601 – X5804BYA Río Cuarto (Cba.) - Argentina.  
correo-e: pvarela@ing.unrc.edu.ar

### RESUMEN

Para la determinación de la resistencia mecánica de cáscaras cerámicas de fundición de precisión, la industria de la fundición emplea habitualmente un ensayo de flexión, a los efectos de la obtención de un parámetro denominado MOR (Módulo de ruptura), que se relaciona directamente con la calidad del molde obtenido, en cuanto a su fortaleza mecánica.

Dicha determinación es de una escala relativamente grande, no pudiendo establecer el origen de la fractura de la probeta, como así tampoco el mecanismo de propagación de la fisura generada por el ensayo.

A los efectos de aumentar el conocimiento de dichos mecanismos, el presente trabajo introduce la técnica de Emisión Acústica, para el monitoreo de lo que ocurre durante un ensayo de flexión de cáscara cerámica para fundición de precisión, elaborada con silicato de sodio como aglomerante.

Dicha técnica de Emisión Acústica se emplea habitualmente para el análisis de los mecanismos de falla en diferentes materiales: metales, cerámicos, y materiales compuestos.

Se demuestra con este estudio, la enorme utilidad de la técnica propuesta, para avanzar en el conocimiento de los mecanismos de falla de moldes cerámicos, que tiene una tasa muy elevada en la industria de la fundición.

**Palabras Claves:** Fundición de precisión, Cáscaras cerámicas, Emisión Acústica.



# IV CAIM 2014

Cuarto Congreso Argentino de Ingeniería Mecánica



UNIVERSIDAD NACIONAL DEL NORDESTE  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
Resistencia Chaco - Rep. Argentina

FORO  
DOCENTE  
DEL ÁREA  
MECÁNICA  
DE LAS  
INGENIERÍAS

FoDAMI

## 1. INTRODUCCIÓN

Emisión Acústica (EA) puede definirse como aquellas ondas elásticas de alta frecuencia que se producen debido a la energía liberada dentro de un material durante un proceso dinámico, por ejemplo la propagación de una fisura en un material cerámico, o la rotura de fibra en un material compuesto. En la mayoría de los experimentos con cerámicos y compuestos, solamente se detecta el rango de 50 kHz – 10 MHz, a los efectos de filtrar las vibraciones mecánicas, y el límite superior se corresponde con el propio de los materiales piezoeléctricos que componen el sensor. La Emisión Acústica se aplica en casi todas las áreas de ciencia y tecnología, desde investigación de daños en cerámicos y compuestos (Lugovy et al. [1], Maksoud et al. [2], Kostopoulos et al [3]); hormigón (Ohtsu [4], Landis [5], Chun-Li Lin [6]); y metales (Mukhopadhyay et al. [7], Li et al. [8]). Posteriormente se ha trabajado en caracterización de cerámicos basados en caolín (Papargyris y Papargyri [9]), compuestos de matriz cerámica (Maillet et al. [10], Momon et al. [11]), tenacidad a la fractura en compuestos de matriz cerámica reforzados con fibras (Hui Mei et al [12]), y monitoreo de daño en minicompuestos utilizando Emisión Acústica y Ultrasonidos, en forma combinada (Maillet et al. [13]).

En el análisis por Emisión Acústica, el material emite ondas elásticas, como resultado de generación dinámica de defectos y su crecimiento. Investigaciones en el campo de EA han demostrado que éstos son continuos y tipo ráfaga.

La Emisión Acústica asociada con deformación plástica, movimiento de dislocaciones y transformaciones de fase, es usualmente continua, teniendo normalmente bajas amplitudes, y con ritmos de eventos en aumento, presentando un pico en su cantidad de eventos cerca de la tensión de fluencia del material y desde allí decrece exponencialmente. Generalmente, la Emisión Acústica debida a un crecimiento de fisura es intermitente (tipo ráfaga) y tiene gran amplitud. La energía liberada puede estar originada de energía elástica almacenada, con propagación de fisura y deformación plástica, o de energía química libre almacenada como un cambio de fase, y el ritmo de eventos se incrementa rápidamente cerca de la rotura. En materiales compuestos y materiales multifásicos, es muy probable que los dos tipos de emisión ocurran simultáneamente. La fractura de fibras producen eventos de alta energía en forma de ráfagas, mientras que deformación de la matriz y despegado de fibras producen eventos continuos de Emisión Acústica. Adicionalmente a lo anterior, la estructura del material por donde se propaga la EA, afectan las características de ésta, por ejemplo por absorción, esparcimiento o dispersión de ondas elásticas. Además, el agente de acoplamiento entre material y transductor, el tipo de transductor y otros factores, afectan las características de las ondas generadas.



Un evento de Emisión Acústica (hit) idealizado se muestra en la figura 1. Características tales como: conteo de ondas, conteo de eventos, análisis de frecuencia y análisis de amplitud, han sido utilizados a los efectos de decodificar la información que posiblemente los eventos de Emisión Acústica lleven con ellos.

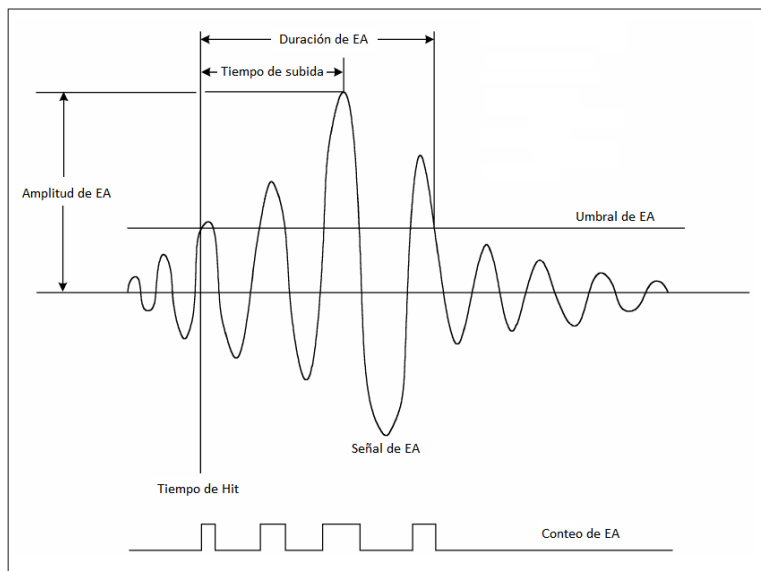


Figura 1. Diagrama de extracción de características de un Hit de Emisión Acústica (EA)

## 2. PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

### 2.1 Elaboración de muestras de Material Cerámico

Fueron elaboradas muestras de molde cáscara para su análisis, en todos los casos siguiendo el procedimiento descrito por Varela et al [14], el cual emplea ligante base agua.

Fueron utilizados modelos prismáticos de cera de 70 mm x 30 mm x 10 mm, fabricados por inyección en matriz metálica, sobre los cuales se elaboraron los moldes tipo cáscara cerámica, según se muestra en la figura 2. De cada uno de los modelos, se obtenían dos probetas cerámicas.

La secuencia completa de operaciones utilizada para la elaboración de las cáscaras cerámicas se describe a continuación.

El moldeado se realizó en forma sucesiva a la inmersión de los modelos en el barro refractario, seguido del correspondiente estucado con distintos materiales refractarios: ortosilicato de circonio y chamote sílico aluminoso. Fue repetido dicho proceso hasta completar seis capas de barro refractario y relleno. Se utilizó en todas las capas el Silicato de Sodio como aglomerante con agente



# IV CAIM 2014

Cuarto Congreso Argentino de Ingeniería Mecánica



UNIVERSIDAD NACIONAL DEL NORDESTE  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
Resistencia Chaco - Rep. Argentina

FORO  
DOCENTE  
DEL AREA  
MECANICA  
DE LAS  
INGENIERIAS

FoDAMI

humectante y antiespumante, variando el refractario del barro y del relleno de cada capa.

Se utilizaron como materiales refractarios harina de circonio #325, arena de circonio con índice de fineza según American Foundrymen's Society (AFS) 110 y chamote de distintos tamaños de partícula.

Para la construcción de los barros se empleó una mezcladora rotativa a paletas y el estucado se aplicó en todos los casos por lluvia de refractario.



Figura 2. Modelo de cera (izquierda) sobre el cual se moldeó la cáscara cerámica (derecha)

En todos los casos, la elaboración de los moldes fue realizada en una sala de moldeo acondicionada a 20/21°C y 50/55 % de HR.

A cada modelo de cera, se le aplicó el barro refractario por inmersión y se lo estucó con arena de circonio, procediéndose a continuación al fraguado del mismo en una atmósfera de dióxido de carbono durante cuatro minutos. Este procedimiento se repitió en las sucesivas capas aplicadas. La capa primaria, que influye en la terminación superficial de la pieza, fue construida con un barro compuesto por ligante y harina de circonio, viscosidad 60/70 seg. Copa Ford N°4.

Para los sucesivos revestimientos o capas secundarias, que determinan la resistencia, se empleó un barro con viscosidad 20/25 seg. Copa Ford N° 4, estucándose la primera, segunda y tercera capa con chamote # 50/70 y las capas cuarta a sexta con chamote # 12/30.

Fraguada la última capa se dejó secar el molde en aire tranquilo y a continuación en aire forzado.



# IV CAIM 2014

Cuarto Congreso Argentino de Ingeniería Mecánica



UNIVERSIDAD NACIONAL DEL NORDESTE  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
Resistencia Chaco - Rep. Argentina

FORO  
DOCENTE  
DEL AREA  
MECANICA  
DE LAS  
INGENIERIAS

FoDAMI

Seguidamente se procedió a la separación de la cáscara y la cera. Luego se dividió la cáscara para obtener las dos muestras para ensayar, y por último, se procedió a calcinar las mismas a 900 °C.

## 2.2 Realización de ensayos de flexión

Las muestras fueron ensayadas a flexión en 3 puntos, utilizando una máquina servohidráulica Amsler 6PZD 1406. El dispositivo de ensayo se muestra en la figura 3.



Figura 3. Ensayo de flexión en 3 puntos de una cáscara cerámica

La carga fue aplicada mediante el movimiento del punzón a una velocidad constante de 0,3 mm/min, la cual es lo suficientemente lenta para evitar la aparición de efectos dinámicos asociados con la velocidad de deformación, y que pudieran entorpecer la normal observación de los fenómenos de Emisión Acústica. Con la realización de los ensayos fueron obtenidas curvas de esfuerzo / deflexión, tal como la mostrada en la figura 4.

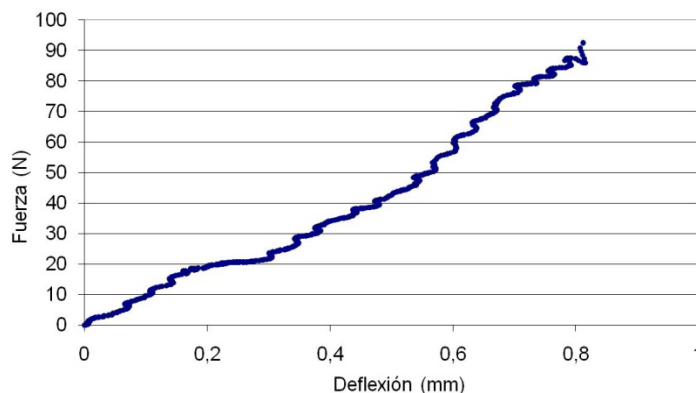


Figura 4. Curva esfuerzo / deflexión para una probeta cerámica



# IV CAIM 2014

Cuarto Congreso Argentino de Ingeniería Mecánica

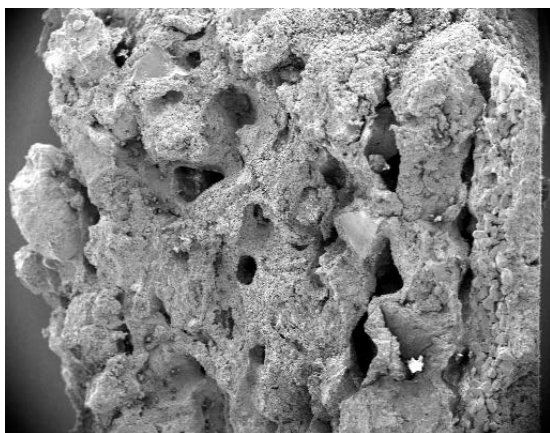


UNIVERSIDAD NACIONAL DEL NORDESTE  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
Resistencia Chaco - Rep. Argentina

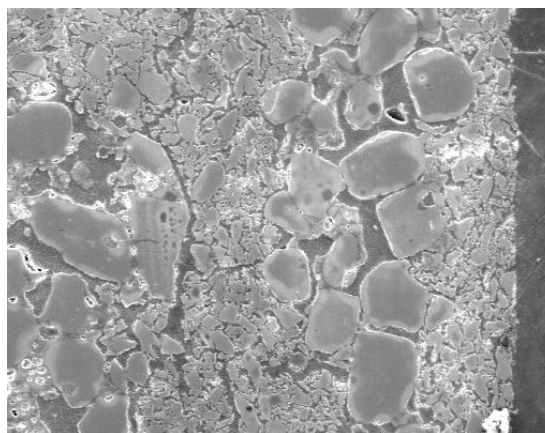
FORO  
DOCENTE  
DEL ÁREA  
MECÁNICA  
DE LAS  
INGENIERÍAS

FoDAMI

Puede observarse en la figura 4, que hay una oscilación en los valores de esfuerzo. Ello se debe a la heterogeneidad del material ensayado, que tiene una consistencia de seis capas, donde cada una de las capas consta a su vez de dos subcapas. La figura 5 muestra imágenes de microscopía electrónica de barrido (SEM) de dos probetas: la imagen izquierda muestra una probeta que está partida manualmente, y la imagen derecha muestra una probeta que ha sido pulida. Se observa además una gran porosidad del material, que es necesaria para la evacuación de los gases durante el proceso de solidificación del metal.



1 mm.  
↔



100 μm.  
↔

Figura 5. Imágenes SEM de probetas. Izquierda: probeta partida manualmente; Derecha: probeta pulida

## 2.2.1 Obtención de señales de Emisión Acústica

Sobre los dispositivos de soporte de la probeta para los ensayos de flexión, se montaron dos sensores para captar señales de Emisión Acústica, lo cual puede apreciarse en la figura 3.

Tabla 1. Características de los sensores utilizados

Características	Sensores	
	R15I	WDI
Capacidad del sensor (con cable RG-58)	hasta 300 m.	hasta 91 m.
Sensibilidad de Pico (Ref V/m/s) [Ref/mbar]	(109) [-24.5]	(87) [-28]
Rango de frecuencias de operación (kHz)	70 - 200	100 - 1000
Frecuencia de Resonancia (kHz)	125* - 153**	125* - 500**

\* Denota respuesta a ondas planas (ángulo de incidencia normal a la cara del sensor)

\*\* Denota respuesta a ondas superficiales (ángulo de incidencia transversal o paralelo a la cara del sensor)

Fueron utilizados dos sensores comerciales de EA para este estudio, los modelos R15I y WDI de Physical Acoustics Corporation. Sus características se resumen en la tabla 1. Los sensores fueron anclados a la máquina de ensayo usando la cera de abeja sintética para asegurar una fijación adecuada.

Los sensores fueron conectados a un sistema de adquisición de datos para Emisión Acústica marca Physical Acoustics Corporation, modelo “PCI-2 Based AE System”. El sensor R15I fue conectado directamente a la placa, mientras que el sensor WDI requirió de un preamplificador externo. El esquema de conexiones empleado se puede apreciar en la figura 6.

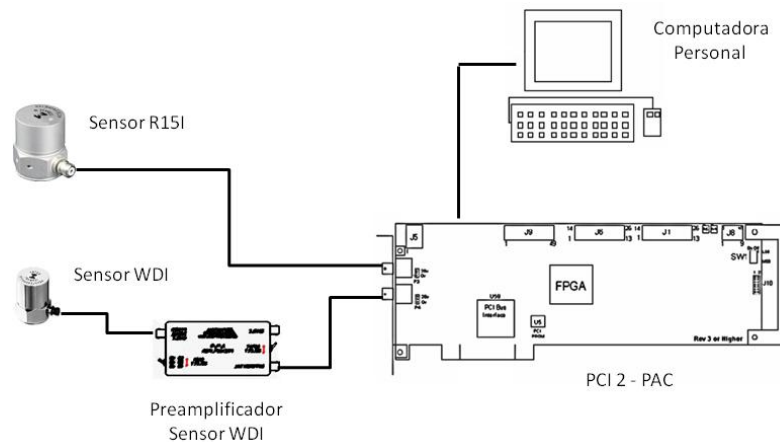


Figura 6. Esquema de conexiones sensores / placa / ordenador

Con esta configuración se pudo registrar el número de eventos, sus amplitudes y el número de ondas de cada evento. Las ondas elásticas generadas cuando la muestra cerámica reacciona a los efectos de disminuir su energía interna, viajan como señales acústicas en todas las direcciones y pueden detectarse por los sensores instalados, los cuales convierten las ondas acústicas en tensión eléctrica de baja amplitud. Las señales de ambos sensores fueron pre-amplificadas con una ganancia de 40 dB. El contenido no correlacionado debido a ruido asociado a defectos de acoplamiento en el montaje, vibraciones mecánicas de la máquina de ensayos, ruido electrónico y ambiente, etc., fue filtrado en forma analógica con frecuencias de 20 kHz a 400kHz. La amplificación es necesaria debido a que las tensiones producidas son de muy baja amplitud. La Frecuencia de Muestreo se fijó en 1 MHz.

### 2.2.2 Procesamiento de señales de Emisión Acústica

El procesamiento de las señales de Emisión Acústica obtenidas, fue realizado con el software



# IV CAIM 2014

Cuarto Congreso Argentino de Ingeniería Mecánica



UNIVERSIDAD NACIONAL DEL NORDESTE  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
Resistencia Chaco - Rep. Argentina

FORO  
DOCENTE  
DEL AREA  
MECANICA  
DE LAS  
INGENIERIAS

FoDAMI

“AEWIN”, que almacena los datos en forma digital, en función del tiempo. El sistema provee información sobre amplitud de hit y número de ondas por evento.

Cada evento se define cuando se cumplen las condiciones de superar el umbral de tensión establecido, y un tiempo muerto fijo (por ejemplo, el tiempo transcurrido sin superar el umbral de tensión, con el cual se evita la medición de reflexiones y ondas de arribo tardío, mientras que el cruce de umbral próximo define el comienzo de un nuevo evento). De esta manera cada vez que la señal de Emisión Acústica excede el umbral de tensión, se registra un evento, y el siguiente evento será registrado si dentro de la duración del hit establecida y del tiempo de rearmado del sistema de adquisición no hay otro cruce de umbral. El sistema tiene una memoria que cuenta y registra la cantidad de eventos, mientras que otra almacena las amplitudes máximas.

### 3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Con la configuración ya mencionada, fueron registradas las actividades de Emisión Acústica producidas por la carga de las probetas cerámicas de fundición de precisión. El monitoreo de los eventos de EA de las muestras bajo carga tensional, puede dividirse en dos etapas. En la primera etapa, el daño (una discontinuidad activa) dentro de la muestra produce un evento acústico (la emisión de energía acústica) que propaga a través del material y llega al transductor (sensor). En la segunda etapa, la onda acústica se convierte en una señal electrónica equivalente, y finalmente en una cuenta de Emisión Acústica. Se supone que en el caso de materiales estructurales cerámicos multifase, donde existen tensiones diferentes entre partículas, la tensión mínima para la cual comienza la actividad acústica, coincide con el comienzo de fractura en un grano. Los resultados de Emisión Acústica se pueden apreciar en las figuras 7 y 8. En la figura 8 se puede apreciar cómo los eventos desaparecen cuando el material se ha fracturado totalmente.

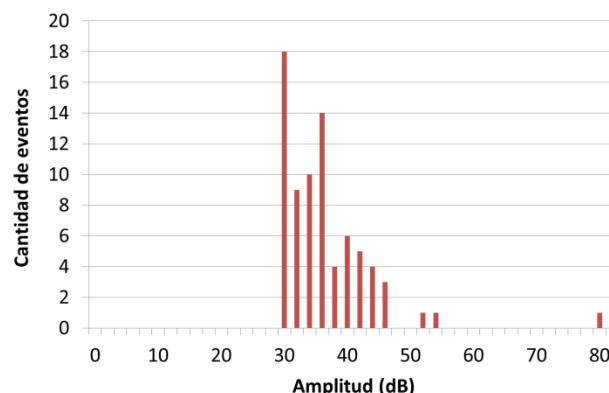


Figura 7. Resultados obtenidos de Emisión Acústica: Cantidad de eventos en función de la amplitud (dB)



# IV CAIM 2014

Cuarto Congreso Argentino de Ingeniería Mecánica



UNIVERSIDAD NACIONAL DEL NORDESTE  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
Resistencia Chaco - Rep. Argentina

FORO  
DOCENTE  
DEL AREA  
MECANICA  
DE LAS  
INGENIERIAS

FoDAMI

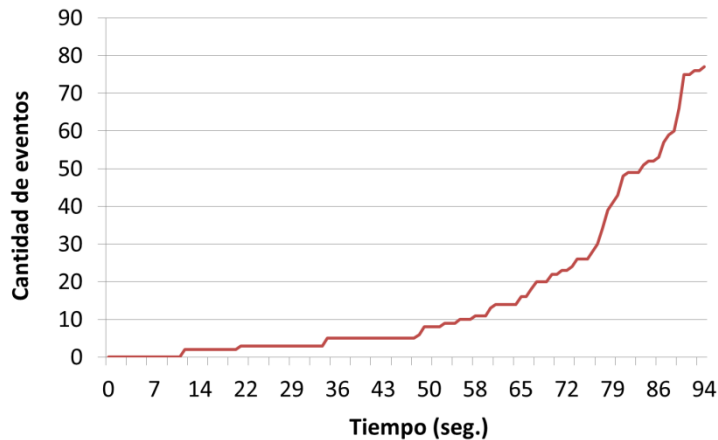


Figura 8. Resultados obtenidos de Emisión Acústica: cantidad de eventos en función del tiempo (seg.)

En la figura 9 se puede apreciar un gráfico que relaciona el esfuerzo de deflexión en función del tiempo, el cual ha sido registrado por la máquina universal de ensayos. Puede apreciarse la correlación existente entre este gráfico 9, y el anterior (Nº 8).

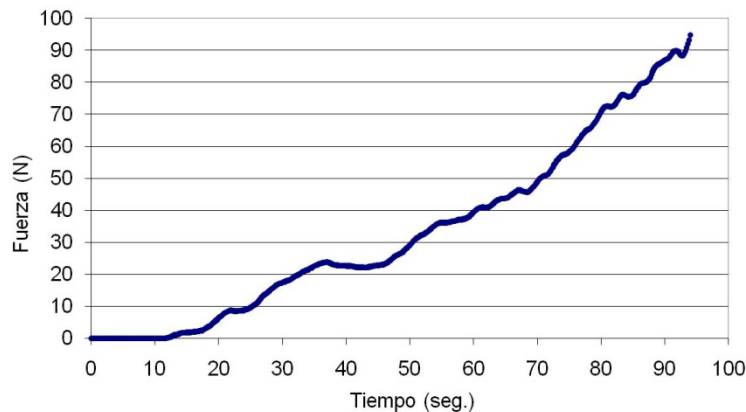


Figura 9. Resultados obtenidos de Emisión Acústica

Examinando los resultados de Emisión Acústica, y comparándolos con las curvas obtenidas por la máquina de ensayos, apoya la opinión generalizada de que en materiales cerámicos de grano grueso, el gran número de eventos indican un alto nivel de actividad de aparición y propagación sub-crítica de fracturas, que fueron debidas al estado tensional interno, el cual a su vez se originó por la carga externa aplicada en una configuración de flexión de 3 puntos. El número de eventos crece, conforme crece la aplicación de la carga. No fue posible hallar un evento único que indique



# IV CAIM 2014

Cuarto Congreso Argentino de Ingeniería Mecánica



UNIVERSIDAD NACIONAL DEL NORDESTE  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
Resistencia Chaco - Rep. Argentina

FORO  
DOCENTE  
DEL ÁREA  
MECÁNICA  
DE LAS  
INGENIERÍAS

FoDAMI

la fractura final, y puede suponerse que la misma comienza por cualquier camino formado por la unión de pequeñas fallas. Este tipo complejo de cerámicos, constituido también por partes vítreas, presenta un comportamiento diferente que aquel observado en vidrios, y que reporta la literatura [9]. En materiales como los estudiados en este trabajo, es razonable esperar que la carga de fractura esté determinada por defectos superficiales aleatorios.

## 4. CONCLUSIONES

Han sido ensayadas a flexión muestras cerámicas de fundición de precisión elaboradas con silicato de sodio como aglomerante, y simultáneamente se ha registrado la actividad de Emisión Acústica que dichas probetas generaban.

Se encontró un importante número de eventos previo al colapso del material, pudiendo suponerse que la fractura final comienza por cualquier camino formado por la unión de pequeñas fallas.

Trabajos futuros podrían correlacionar los resultados de Emisión Acústica, con el nivel de daño ocurrido en este tipo de moldes cerámicos, por solicitaciones debidas a cambios térmicos, o diferencias de humedad. Ello podría conducir a determinar el nivel de calidad del molde obtenido, y disminuir los riesgos de falla durante el proceso de llenado del metal líquido.

## 5. REFERENCIAS

- [1] Logo, M., Orlovskaya, N., Berroth, K., Kuebler, J., Microstructural engineering of ceramic-matrix layered composites: effect of grain-size dispersion on single-phase ceramic strength. *Comp. Sci. Technol.* 59 (2), 283–289. 1999.
- [2] Maksoud, T.M.A., Mokbel, A.A., Morgan, J.E., Evaluation of surface and sub-surface cracks of ground ceramic. *J. Mater. Process. Technol.* 88 (1–3), 222–243. 1999.
- [3] Kostopoulos, V., Pappas, Y.Z., Markopoulos, Y.P., Fatigue damage accumulation in 3-dimensional SiC/SiC composites. *J. Eur. Ceram. Soc.* 19 (2), 207–215. 1999.
- [4] Ohtsu, M., Estimation of crack and damage progression in concrete by quantitative acoustic emission analysis. *Mater. Eval.* 57 (5), 521–525. 1999.
- [5] Landis, E.N., Micro–macro fracture relationships and acoustic emissions in concrete. *Constr. Build. Mater.* 13 (1–2), 65–72. 1999.
- [6] Chun-Li Lina, Wen-Chuan Kuo, Jin-Jie Yu, Shao-Fu Huang, “Examination of ceramic restorative



# IV CAIM 2014

Cuarto Congreso Argentino de Ingeniería Mecánica



UNIVERSIDAD NACIONAL DEL NORDESTE  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
Resistencia Chaco - Rep. Argentina

FORO  
DOCENTE  
DEL AREA  
MECANICA  
DE LAS  
INGENIERIAS

FoDAMI

material interfacial debonding using acoustic emission and optical coherence tomography”, *Dental Materials* 29, 382–388. 2013.

[7] Mukhopadhyay, C.K., Ray, K.K., Jayakumar, T., Raj, B., Acoustic emission from tensile deformation of unnotched and notched specimens of AISI type 304 stainless steels. *Mater. Sci. Eng., A* 255 (1–2), 98–106. 1998.

[8] Li, X., Dong, S., Yuan, Z., Discrete wavelet transform for tool breakage monitoring. *Int. J. Mach. Tools Manuf.* 39 (12), 935–1944. 1999.

[9] Papargyris A.D., Papargyri S.A., Acoustic emission characterization of kaolin-based clay ceramics, *Applied Clay Science* 18, 191–204. 2001.

[10] Mailliet E., Godin N., R’Mili M., Reynaud P., Fantozzi G., Lamon J., “Real-time evaluation of energy attenuation: A novel approach to acoustic emission analysis for damage monitoring of ceramic matrix composites”, *Journal of the European Ceramic Society* 34, pp. 1673–1679. 2014.

[11] Momon S., Moevus M., Godin N., R’Mili M., Reynaud P., Fantozzi G., Fayolle G., “Acoustic emission and lifetime prediction during static fatigue tests on ceramic-matrix-composite at high temperature under air”. *Composites: Part A* 41, 913–918. 2010.

[12] Hui Mei, Yuyao Sun, Lidong Zhang, Hongqin Wang, Laifei Cheng, “Acoustic emission characterization of fracture toughness for fiber reinforced ceramic matrix composites”. *Materials Science & Engineering A* 560, 372–376. 2013.

[13] Mailliet E., Godin N., R’Mili M., Reynaud P., Fantozzi G., Lamon J., “Damage monitoring and identification in SiC/SiC minicomposites using combined acousto-ultrasonics and acoustic emission”, *Composites: Part A* 57, 8–15. 2014.

[14] Varela Pablo, Cotella Nelson, Oviedo Osvaldo, Kohl Rodolfo, "Nuevo Procedimiento para la Construcción de Moldes Cerámicos de Microfusión", *Actas de III Congreso anual de la Sociedad Mexicana de Ingeniería Mecánica, Morelia Michoacán México*, pp. 82-87, 1997.