

E-GLEA 10

ACTAS de Trabajos Completos

GRUPO LATINOAMERICANO
de
EMISION ACUSTICA **GLEA**

Décimo Encuentro Internacional del
Grupo Latinoamericano de Emisión Acústica

14-16 de agosto de 2019
Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional del Comahue
UnCo, Neuquén
NEUQUÉN, ARGENTINA

ISBN 978-987-1323-65-4



COMISIÓN NACIONAL
DE ENERGÍA ATÓMICA



E-GLEA 10

ACTAS de Trabajos Completos

Décimo Encuentro Internacional del
Grupo Latinoamericano de Emisión Acústica

14-16 de agosto de 2019

Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional del Comahue
UNCo, Neuquén

NEUQUÉN, ARGENTINA



COMISIÓN NACIONAL
DE ENERGÍA ATÓMICA

Comisión Nacional de Energía Atómica - CNEA

Actas de Trabajos Completos del E-GLEA 10: Décimo Encuentro del Grupo Latinoamericano de Emisión Acústica / compilado por Dino Filipussi ; Martín Pedro Gómez ; editado por Martín Pedro Gómez ; Dino Filipussi ; José E. Ruzzante. - 1a edición especial - Ciudad Autónoma de Buenos Aires : Comisión Nacional de Energía Atómica - CNEA, 2020.

Libro digital, PDF

Archivo Digital: descarga y online

Edición para Comisión Nacional de Energía Atómica - CNEA

ISBN 978-987-1323-65-4

1. Ingeniería Acústica. 2. Ciencias Tecnológicas. 3. Ingeniería Mecánica. I. Filipussi, Dino, comp. II. Gómez, Martín Pedro, comp. III. Ruzzante, José E., ed.

CDD 620.21

ISBN 978-987-1323-65-4



Compilado por: Dino Filipussi y Martín Pedro Gómez

Editores: Martín Pedro Gómez, Dino Filipussi, Daniel Boccanera y José E. Ruzzante

Comisión Nacional de Energía Atómica – CNEA

CABA, junio de 2020

ISBN 978-987-1323-65-4

COMITÉ ORGANIZADOR

Dr. José RUZZANTE	UTN - UNTREF
Dr. Martin GÓMEZ	CNEA - UTN
Dra. Isabel LÓPEZ PUMAREGA	CNEA
Dr. Dino FILIPUSSI	CNEA
Mg. Daniel BOCCANERA	Mg. Daniel BOCCANERA
Ing. Jorge CHIEMENTON	UNCo
Sr. Alejandro MONTENEGRO	UNCo
Ing. José ESTEVEZ SUGOSKY	UNCo
Ing. Cristian MEINL	UNaM
Ing. Enrique VARGAS	UCA (Paraguay)
Dra. Miriam NEYRA ASTUDILLO	UTN - Delta
Mg. Ing. Guido FERRARI	UTN - Delta

COMITÉ CIENTÍFICO

Dr. José RUZZANTE	UTN - UNTREF
Dr. Martin GÓMEZ	CNEA - UTN
Dra. Isabel LÓPEZ PUMAREGA	CNEA
Dr. Dino FILIPUSSI	CNEA
Dra. Yolanda VARGAS	USACH (Chile)
Dra. Rossana JACA	UNCo
Dra. Mónica ZALAZAR	UNCo
Ing. German KEIL	UNCo
Dr. Daniel COLÓN	UNCo
Dr. Antolino GALLEGO	UG (España)
Dr. Linilson PADOVESE	USP (Brasil)
Dr. Francisco RESCALVO	UG (España)
Dra. Elisabet SUAREZ	UG (España)

INSTITUCIONES AUSPICIANTES

Grupo Latinoamericano de Emisión Acústica (GLEA)
Comisión Nacional de Energía Atómica Argentina (CNEA)
Facultad de Ingeniería – Universidad Nacional del Comahue – (UNCo)
Facultad de Ingeniería – Regional Delta – Universidad Tecnológica Nacional – (UTN)
Facultad de Ingeniería – Universidad Nacional de Tres de Febrero – (UNTREF)
Facultad de Ingeniería – Universidad Nacional de Misiones – (UnaM)
Universidad de Granada – (UG) – España
Universidad Católica de Asunción – (UCA) – Paraguay
Laboratorio de Acústica e Meio Ambiente – Universidade de São Paulo – (LACMAN) – Brasil

A modo de prólogo

El 4 de abril de 1997, creamos en Buenos Aires el Grupo Latinoamericano de Emisión Acústica (GLEA), con el fin de: promover, desarrollar, investigar, realizar reuniones, sobre temas de emisión acústica. Entre el 6 y 10 septiembre 1999 se realizó el primer encuentro del GLEA que llamamos E-GLEA 1. Parece mentira que, salvo una vez, hayamos podido mantener continuidad en la realización de los encuentros cada dos años. Los diez y los veinte años de la creación del GLEA se conmemoraron en la Universidad Nacional de Misiones, en la ciudad de Oberá.

Estoy convencido de que cumplimos con la promoción de la EA, no sólo en el país, por medio de charlas, conferencia y cursos, sino también en países limítrofes. En los comienzos únicamente el Centro Atómico Constituyente de la CNEA realizaba tareas en EA; hoy son varias las instituciones que investigan y prestan servicios. En ese sentido, los sucesivos Encuentros E-GLEA se fueron realizando en diferentes instituciones y países; CNEA-CAC, UTN-Mendoza, UNM-Oberá, UNTREF- Bs.As., Rio de Janeiro Brasil, LAMEF-UFRGS Porto Alegre Brasil, Taormina Italia.

Recuerdo que en los comienzos cuando dábamos cursos, principalmente en la industria, nos preguntaban si podíamos hacer alguna prueba para verificar que lo comentado era realmente cierto. En una ocasión dicté el curso en una empresa de fabricación de tubos de San Juan, cuando finalicé tenían un tubo preparado para la realización de un ensayo, sin previo aviso.

Desde los inicios se trabajó en la confección de Normas Técnicas en IRAM, posteriormente Socios del GLEA de Brasil y Argentina, participaron en tareas de Normalización en Emisión Acústica en el Comité Sectorial MERCOSUR (CSM 24). Para ser sincero, en esta área nos faltó, pese a varios intentos, la nivelación de personal en la técnica de EA. Por suerte con el impulso de la UNCo (Neuquén) y CNEA estamos próximos a concretarlo.

Debemos mencionar la participación en los E-GLEA de destacados investigadores y tecnólogos nacionales e Internacionales, sería muy extenso nombrarlos a todos.

Para finalizar, quiero agradecer la colaboración y excelente organización del Décimo Encuentro del GLEA que se realizó en la Facultad de Ingeniería de la UNCo, en particular al Ing. Daniel Boccanera y su excelente grupo de trabajo.

También quiero destacar el trabajo del Dr. Martin Gómez y Dr. Dino Filipussi por tomar la posta y seguir adelante.

Hasta el próximo Encuentro,

Dr. José Ruzzante

Buenos Aires, junio 2020



Índice

RESULTADOS PREMILINARES DE UNA CONSTRUCCIÓN DE SENSORES ULTRASÓNICOS	
<i>Albalat A.M., Ruzzante J.E., Carballal C.A., Cavalchini J., Elorriaga M. y Antunez M.E.</i>	1
INFLUENCIA DO SISTEMA DE CONTROLE DA CARGA EM ENSAIOS DE EMISSAO ACUSTICA: ESTUDO TEORICO EXPERIMENTAL	
<i>Almeida W.R., Rojo Tanzi B.N., Lacidogna G., De León D.M. y Iturrioz I.</i>	7
REDES NEURONALES APLICADAS AL MONITOREO DE PROCESOS DE PERFORACIÓN EN PROBETAS DE MATERIAL GEOLÓGICO	
<i>Basgall A., Ferrari, G., Gómez, M.</i>	18
ESTUDIO DE PROPIEDADES MECÁNICAS EN TUBOS DE CFRP	
<i>Bonelli Toro A., Podetti G., Arcone D., Daverio N., Hazarabedian A. y Gómez M.P.</i>	29
INTERFAZ PARA VISUALIZAR Y PROCESAR SEÑALES DE EMISIÓN ACÚSTICA	
<i>Bonelli Toro A.G., Iofrida M.J., y Gómez M.P.</i>	37
ESTUDIO DE LA CONDICIÓN DE HERRAMIENTAS DE MECANIZADO DE MATERIALES COMPUESTOS UTILIZANDO EMISIÓN ACÚSTICA	
<i>Bonelli Toro A.G., González Fuster M., Fernández G., Antico F., Vogt P. y Gómez M.P.</i>	46
PROPAGACIÓN DE ONDAS EN SÓLIDOS ANISOTRÓPICOS: PREDICCIÓN DE VELOCIDAD EN POLICRISTALES	
<i>Cowes D.A., Mieza J.I. y Gómez M.P.</i>	56
METODOLOGÍA PARA ESTIMAR LA INFLUENCIA DE EVENTOS ANÓMALOS EN LOS NIVELES DE RUIDO DEL TRÁNSITO RODADO DE LA CIUDAD AUTÓNOMA DE BUENOS AIRES	
<i>Crapa M.N., Masson F., Mansilla J., Zanardi E. y Lombera E.</i>	61
MONITORAMENTO DA DEGRADAÇÃO DE COMPÓSITO PRFV APLICANDO A TÉCNICA DE EMISSÃO ACÚSTICA (EA) COMBINADA COM SENSORES DE REDE DE BRAGG EM FIBRA ÓTICA (FBG)	
<i>Da Silva D.S., Groth E.B., Lutckmeier F., Zuglian G., Jaques R., de Lima T.S. y Clarke T.G.</i>	71
EMISIÓN ACÚSTICA APLICADA AL MONITOREO DE PROCESOS DE PERFORACIÓN EN PROBETAS DE MATERIAL GEOLÓGICO	
<i>Ferrari G., Basgall A., Gómez M.</i>	81
ANÁLISIS DE INCERTIDUMBRE PRODUCIDA POR EL CAUDAL VEHICULAR MEDIANTE EL USO DEL MÉTODO DE CÁLCULO NMPB-ROUTES-96	
<i>Galimberti J., Ruffa F. y Stasi A.</i>	88

ANÁLISIS MODAL BASADO EN MEDICIONES NO INVASIVAS CON UN ARREGLO DE MICRÓFONOS COMERCIAL	
<i>Garcia J. y Boelke O.</i>	101
ANÁLISE NUMÉRICA DA EMISSÃO ACÚSTICA APLICADA AO MONITORAMENTO DE INTEGRIDADE DE ESTRUTURAS	
<i>Groth E.B., Shumacher G., Rojo Tanzi B.N., Clarke T.G.R., Jacques R.C. y Iturrioz I.</i>	109
ACOUSTIC EMISSION MONITORING OF 16" PIPE SEGMENTS DURING HYDROSTATIC TESTING	
<i>Jacques R.C., Lima T. S., Soares S.D., Groth E.B. y Clarke T.G.R.</i>	120
ANALISIS DE VIBRACIONES EN UNA CAJA REDUCTORA DE UNA TURBINA	
<i>Klempnow. A., Piñeyro J.J., Bello A. y Elfi F.</i>	132
MEDICIÓN DE RUIDO EN PEQUEÑAS TURBINAS EÓLICAS	
<i>Labriola C.L., Colón D.L., Lassig J. y Palesse C.</i>	141
ANALISIS PARA DETERMINAR UNA CLASIFICACIÓN CUALITATIVA DEL ESTADO DE FONDOS DE TANQUES A PARTIR DE ENSAYOS DE EMISION ACUSTICA Y SU RELACIÓN CON EL FENOMENO DE LA CORROSIÓN ACTIVA	
<i>Montenegro A.N.</i>	151
ESTUDIO DE LA TRANSFORMACIÓN MARTENSITICA EN UN ACERO AISI 321 MEDIANTE TÉCNICAS MAGNÉTICAS	
<i>Neyra Astudillo M.R., Gómez M.P. y Pardal J.</i>	158
PREDICCIÓN DE LA RESISTENCIA AL DESGASTE POR ABRASIÓN DE RECARGUES POR SOLDADURA A TRAVÉS DE EMISIÓN ACÚSTICA	
<i>Peix D.A., Ávila E., Molina G., Ferrari G., Folgueiras J. y Gómez M.P.</i>	175
ANÁLISIS, TRANSFORMACIÓN Y RESÍNTESIS DE SONIDO: UNA IMPLEMENTACIÓN DE LA TÉCNICA ATS COMO BASE PARA POSIBLES INTERRELACIONES ENTRE SEÑALES SONORAS Y AUDIO DIGITAL	
<i>Perna G.L., Paupy P.E. y Huggenberger D.</i>	185
ESTUDIO DE LA NORMA DE ENSAYO DE EMISIÓN ACÚSTICA PARA LA DETECCIÓN DE CORROSIÓN EN TANQUES LLENOS DE LÍQUIDO EN ARGENTINA	
<i>Semorile M., Montenegro A.N. y Tellería G.</i>	197
NORMAS TÉCNICAS DE EMISIÓN ACÚSTICA EN ARGENTINA Y MERCOSUR	
<i>Semorile M.</i>	205
A REDUCED ORDER MODEL OF WAVE PROPAGATION AND VIBRATIONS IN RODS AND TUBES OF UNIFORM CROSS SECTIONS	
<i>Suárez Antola R.</i>	221

ESTUDIO E IMPLEMENTACIÓN DE CUADRO DE CLASIFICACIÓN CUANTITATIVO PARA ENSAYOS DE EMISIÓN ACÚSTICA EN FONDOS DE TANQUES EN ARGENTINA

Tellería Gonzalo, Tellería Juan Manuel y Castillo Canache Argenis 233

ESTUDIO DE LA PROPAGACION DE FISURAS MEDIANTE EMISION ACÚSTICA

Vatcoff L. y Santarelli E. 241

SISTEMA AUTÓNOMO PARA MONITOREO ACÚSTICO DE CETÁCEOS

Veca A.C., Valesse N., Ruzzante J.E., Albalat A.M. y Marino A. 253

ENERGÍA Y ENTROPÍA WAVELET DE SHANNON EN SEÑALES DE EMISIÓN ACÚSTICA PARA EVALUACIÓN DE DAÑO EN ROCA ANDESITA

Zitto M.E., Sassano M.P., Muszkats J.P., Filipussi D.A. y Piotrkowski R. 262

LA EMISIÓN ACÚSTICA, SU HISTORIA EN LA ARGENTINA

López Pumarega M.I., Ruzzante J.E y Gómez M.P. 273

RESULTADOS PRELIMINARES DE UNA CONSTRUCCIÓN DE SENSORES ULTRASÓNICOS

Albalat A.M.^{a, c}, Ruzzante J.E.^{a, c}, Carballal C.A.^a, Cavalchini J.^a, Elorriaga M.^b,
Antunez M. E.^b

^aLaboratorio de Ensayos no destructivos, Departamento de Mecánica, Universidad
Tecnológica Nacional Facultad Regional Delta, ARGENTINA

^bLaboratorio de Química, Departamento de Química, Universidad Tecnológica Nacional
Facultad Regional Delta, ARGENTINA

^cGrupo de Investigación en Acústica Submarina, Universidad Nacional de Tres de Febrero,
ARGENTINA

e-mail: aalbalat@gmail.com

RESUMEN

En este trabajo se exponen los resultados preliminares de la construcción de distintos “backing” para utilizarse en un sensor de ultrasonido. Estos deben tener características especiales de amortiguamiento y atenuación, que generalmente no figuran en los textos sobre el tema. El estudio fue realizado en el laboratorio de END y de Química de la Universidad Tecnológica Nacional Fac. Reg. Delta. El objetivo final de este trabajo es construir sensores de ultrasonido para la generación de ondas de Lamb con el objeto de usarlos en la detección de fallas en ductos. Para tal fin se ensayaron compuestos, previamente pesados y mezclados, todos a base de tungsteno, negro de humo, cerámica y en menor proporción, sulfato de cerio, óxido de plomo y óxido de zinc. También se ensayaron muestras con los componentes base solamente. El tiempo de solidificación fue de aproximadamente 12 hs. Una vez solidas se determinó la densidad de las mismas y se realizaron ensayos de ultrasonido. Se determinaron las atenuaciones acústicas de las muestras a una frecuencia de 5 MHz utilizando equipos y sensores de END convencionales, con la técnica de transmisión. También se midió la resistencia eléctrica de las superficies frontales y posteriores de las muestras, con un medidor a cuatro puntas. Los resultados obtenidos muestran una gran atenuación acústica de las muestras, con una importante dispersión de los valores medidos de resistencia eléctrica. Por intermedio de microscopía se determina la morfología de las mismas. Disponiendo de las obleas piezoeléctricas se inicia la construcción de los primeros sensores que luego serán caracterizados.

Palabras Clave: Sensores, ultrasonido, backing, ondas, ensayos no destructivos.

Introducción a los Backings

Dentro de las diversas técnicas de ultrasonido, hay una de ellas que se encarga de verificar los defectos superficiales en tubos y chapas delgadas, generando y censando ondas de Lamb (un tipo particular de ondas superficiales) sobre la pieza. Para esto es requerido un sensor que genere ondas ultrasónicas, montado sobre una zapata (bloque de polimetimetacrilato con una pendiente particular según el material). El sensor o palpador, es constituido por un conector, un cable bipolar, un disco

piezoeléctrico, una carcasa metálica, una suela protectora y un amortiguador acústico (backing), que se utiliza para amortiguar el impulso inicial generado por el equipo de ultrasonido, el cual también se encarga de realizar la medida de la presión acústica.

El backing o amortiguador, es poco conocido en la literatura actual, por lo que se propone, fundamentalmente, un estudio de la atenuación acústica, y la resistencia eléctrica de unas muestras a realizar. Estos están formados por ciertos compuestos químicos mezclados y fraguados.

Los sensores de ultrasonido para ensayos no destructivos, poseen dos elementos centrales o fundamentales. Uno de estos es un disco piezoeléctrico, que se encarga de realizar la conversión entre energía eléctrica a mecánica y viceversa, y el amortiguador o backing, que va encima de este transductor, para atenuar la onda generada por la parte posterior, reduciendo el factor de selectividad o “Q” del piezoeléctrico. Otras definiciones sobre esta parte del sensor, radican en la utilización de la emisión del piezoeléctrico en una sola de las caras, como contramasa ubicada en la cara posterior que absorbe la energía mecánica en esa dirección, deteniendo la oscilación de la cerámica. De esta manera, se podrá aumentar la resolución del mismo, con la posibilidad de detectar defectos más pequeños. El valor de la resistencia eléctrica del amortiguador debe ser alto para evadir corrientes que fluyan sobre este, ya que esta corriente deberá ser máxima sobre los dos electrodos del piezoeléctrico. La impedancia acústica de la contramasa debe ser lo más similar posible a la del piezoeléctrico, para que haya una mayor transmisión energética hacia el backing y así evitar una reflexión devuelta hacia el cristal. Ramadas y otros diferencian los backings según su valor de impedancia acústica, como altos (16MRayl MKS), medios (8,1 MRayls MKS) y bajos (0,48 Rayls MKS). Generalmente (Low y Jones, Abas et al) se utiliza el tungsteno en polvo por su alto nivel de absorción acústica y por su densidad, lo que causa valores de impedancia acústica altos. Este debe tener un tamaño tal que sea comparable con una longitud de onda, de forma tal que la atenuación de la onda por difusión sea máxima. Por otra parte, la porosidad de la muestra cumple un rol en la atenuación acústica del backing. Para realizar transductores angulados, se debe utilizar un material como interfase que tenga poca pérdida por absorción del material, y tenga una impedancia acústica que no sea disímil a la del sensor ni a la de la carga utilizada (la pieza a analizar). Como en la mayoría de los casos se utilizará acero (material de las chapas y tubos) y el sensor será de PZT, se determinó que el polimetimetacrilato, más conocido como plexiglass, es el mejor material más idóneo.

En cuanto a la protección del cristal piezoeléctrico, debido del desgaste del mismo, se pueden usar diversas resinas o materiales para cuidar y mantener las prestaciones del sensor. Se conoce del trabajo de Rubio y Marrero, y de otros autores, algunos escasos resultados del backing, utilizando araldite, baquelita, epoxy, alumina y otros polímeros y resinas en conjunto la mayoría de las veces con tungsteno, un material característicamente muy duro. Abas et al obtuvieron varios de los parámetros buscados, modificando la proporción de tungsteno respecto del total de la muestra para transductores de 2 y 5 MHz, utilizando mezclas con una relación de 4:1, con resultados suficientes salvo para la atenuación acústica.

Materiales y procedimientos

Se realizaron dos mezclas diferentes, la primera con un acrílico dental y la segunda con un epoxy con dureza shore D82, ambas en conjunto con diferentes óxidos (sulfato de cerio (4), óxido de plomo (2), óxido de zinc, todas calidad analítica) con el fin de elevar la resistencia eléctrica. También a estas dos muestras se les agregó negro de humo (Cabot, Vulcan 6), con el fin de aumentar el amortiguamiento. A ambas mezclas se les agregó tungsteno (wolframio) en polvo. Algunas imágenes de estos compuestos se muestran en la figura 1.

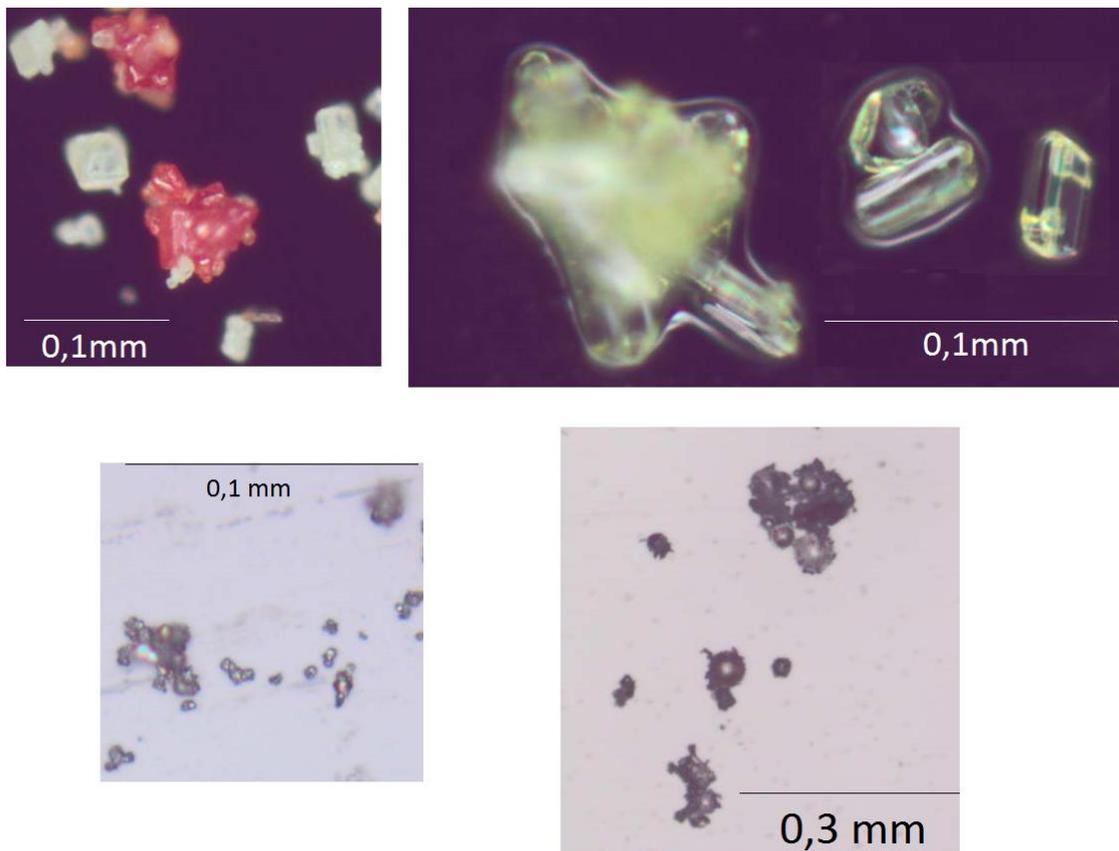


Figura 1. Fotografías tomadas con el microscopio Olympus BX51, en el laboratorio de Optoelectrónica y Metrología Aplicada de la UTN FRD. Fotografía superior izquierda: óxido de plomo, derecha: óxido de cerio. Fotografía inferior izquierda: tungsteno, derecha: acrílico.

Las composiciones utilizadas en la primeras mezclas, constaron de 3g de acrílico, 4g de solvente de acrílico, 3g de tungsteno, 1g de negro de humo y 0,04g de alguno de los tres óxidos previamente mencionados. La cuarta mezcla se realizó sin oxidos. El acrílico fraguó al mezclar sus dos componentes, una parte sólida en polvo con un solvente. Las mezclas se realizaron en un casquete cilíndrico de cerámica. Debido a que estas tres mezclas quedaron con una gran porosidad en su interior, con una pared de 3-5 mm, se realizaron otras 2 mezclas batidas y una más fraguada 48 hs en una bomba de vacío, todas con resultados similares, por lo que se procedió a utilizarse dos mezclas con epoxy. La primer mezcla de epoxy se realizó con 3g de EPO41A (resina de epoxy color marfil), 0,796 g de EPO41B (endurecedor de epoxy), 3,33 g de tungsteno y 1 g de negro de humo, mientras que la segunda mezcla necesitó de 24,035g de EPO41A (resina de epoxy color marfil), 2,09 g de EPO41B (endurecedor de epoxy), 12,375 g de tungsteno y 2,75 g de negro de humo. Esta última preparación lleva mayor porcentaje de tungsteno. La rigidez dieléctrica del epoxy está especificada como de 17 a 19 kV/mm, la cual es más que suficiente para los fines eléctricos del proyecto. Se midió la altura de las muestras de acrílico al fraguarse, la cual resultó en 1,5 cm. Luego las muestras se cortaron en discos de 3mm (acrílico) y de 4,7 mm y 15 mm (epoxy). La densidad de las muestras en acrílico es de 2007 Kg/m³ y de 1402 Kg/m³ y 2757 Kg/m³ para las muestras en epoxy.

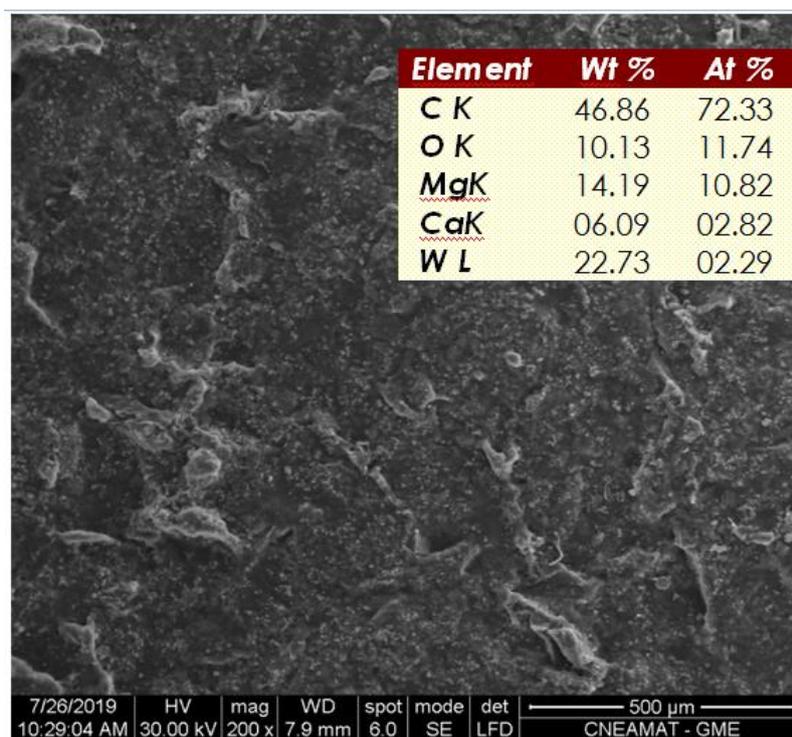


Figura 2. Fotografía electrónica de la muestra realizada con acrílico. En el margen superior derecho se muestra el porcentaje de peso y el porcentaje atómico. Las mismas se tomaron en la CNEA.

Resultados

Los resultados de las mediciones eléctricas sobre la superficie de las mezclas se muestran en la tabla 1. El método de medición a cuatro puntas, también conocido como método de Kelvin, es una técnica de medición de impedancia eléctrica que utiliza un voltímetro y un amperímetro para lograr mediciones más exactas de resistencia que al usar la técnica tradicional de medición a dos puntas. Se utilizó un equipo Signatone SP4 en conjunto con un medidor de impedancia. El nivel de tensión se eligió en 100V, comparables a la amplitud de tensión del pulser. Se tomaron 4 mediciones en cada cara, girándose la muestra 90° entre cada medición. Se registró el menor valor de resistencia medido.

Tabla 1. Resistencias medidas sobre las superficies de las muestras. Las primeras cuatro muestras fueron realizadas en base de acrílico odontológico.

Material	Cara superior	Cara inferior
Sin óxido	500 Ω	> TΩ
Óxido de plomo (2)	24 kΩ	15 MΩ
Sulfato de Cerio (4)	25 kΩ	550 kΩ
Óxido de Zinc	5 MΩ	> TΩ
Epoxy	> TΩ	> TΩ

Se utilizó un equipo de ultrasonido tipo pulso eco marca Sonatest 380M para realizar las mediciones de atenuación acústica de los backings. Se realizó la técnica de transmisión, con dos sensores en ambas caras planas. Los sensores elegidos fueron dos UTX CX-280, de 0,375" de diámetro y 5 MHz de frecuencia.

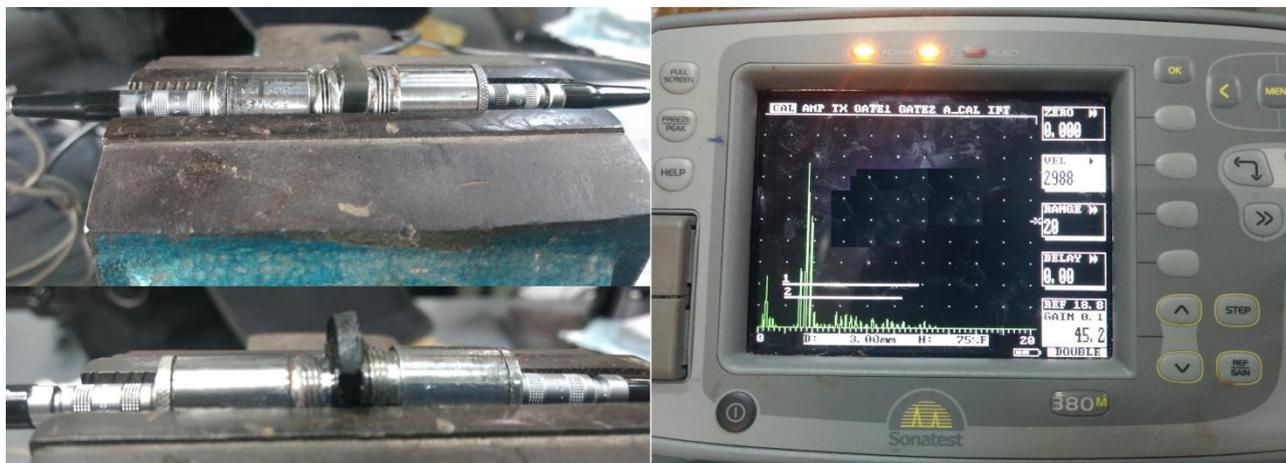


Figura 3. Fotografías de las mediciones de atenuación acústica utilizando la técnica de transmisión, de un bloque de acrílico de 5 mm (superior izquierda) y una muestra de 3 mm (base de acrílico, fotografía inferior izquierda). En la fotografía derecha se puede apreciar la pantalla de una medición realizada sobre la muestra de acrílico

La medición se hizo por comparación, entre un bloque de acrílico puro de 5mm de referencia y la muestra de epoxy de 4,7 mm, ya que no se pudo ver el segundo eco en la pantalla. Con una atenuación de 0,81 db/mm para el bloque (medida en 10 mm), a una ganancia de 18,5 dB para el primer eco a un 80% de altura total de pantalla ATP, se obtiene una atenuación de 4,2 db/mm para la muestra de epoxy, con una ganancia de 32,8 dB también para un 80% de ATP. Con la muestra de acrílico se obtuvo una atenuación de 5,13 db/mm por la diferencia de ganancia requerida para llegar al 80% ATP entre el primer (48dB) y segundo eco (65,4dB). Se consideró una pérdida de divergencia en campo cercano de 2dB. La velocidad de esta muestra se calibró a un valor de 2988 m/s por lo que se obtuvo una impedancia acústica de 6 MRayls MKS.

Para la muestra de 15 mm en epoxy, se utilizó un sensor MiTech F30 de 1MHz y 1", en modo simple (pulso-eco). Se midió el primer eco a una ATP del 80% con una ganancia de 31,5dB y el segundo eco a una ganancia de 63dB. Suponiendo unos 6dB de pérdida por divergencia, se obtiene una atenuación de 0,77db/mm. Cabe aclarar que la pérdida por divergencia que se asume para el cálculo de la atenuación es el peor caso ya que la zona de campo lejano comienza en los 65 mm. La velocidad del sonido se calibró en 2200 m/s, por lo que se obtuvo una impedancia acústica de 6 MRayls MKS. Para un bloque de acrílico de las mismas dimensiones, se obtuvo una atenuación de 0,28 dB/mm, asumiendo también una caída de 6 dB de pérdidas por divergencia.

Conclusiones

Se alcanzaron buenos niveles de atenuación acústica, de 5,18 veces y de 6,33 veces la atenuación del acrílico de referencia para 5MHz y de 2,7 veces en 1 MHz, mientras que las impedancias encontradas fueron de valor medias. Se intentarán conseguir impedancias más altas subiendo la proporción de tungsteno en las mezclas.

También se midió la resistencia eléctrica de una de estas muestras en un medidor de cuatro puntas, registrandose valores en función del óxido utilizado. Los resultados indicaron una gran dispersión de valores según la orientación de la muestra respecto a las puntas en la cara plana evaluada, aunque los valores de resistencia eléctrica encontrados en la muestra con óxido de Zinc son aceptables para

la realización de un backing con este material. Se deberán repetir los ensayos con una mayor cantidad de muestras.

Trabajo a futuro

El paso siguiente será caracterizar al piezoeléctrico que se utilizará en el prototipo (Impedancia real y compleja). A este prototipo se le realizarán las mismas mediciones, como así también se registrará la respuesta temporal y espectral a un pulso. Se deberá medir la impedancia acústica del piezoeléctrico elegido. También debe registrarse el ancho de banda del transductor (caída de -6dB respecto a la frecuencia de resonancia), la evolución de la amplitud de la señal acústica en función del tiempo, la relación señal a ruido, la resolución en acero y la longitud del pulso hasta -20dB respecto al máximo.

Agradecimientos

Agradezco al laboratorio de Optoelectrónica y Metrología Aplicada, al departamento de Mecánica y de Química de la UTN FR Delta y a Miriam Rocio Neyra Astudillo y Andrés Di Donato de la CNEA por las fotografías y mediciones realizadas para este trabajo.

REFERENCIAS

- PEÑA MAESTRE, M.R. "Diseño, construcción y caracterización de un transductor ultrasónico focalizado". Tesis de grado. Universidad Politécnica superior de Gandia. 2014.
- MORALES LOPEZ, E. "MODELADO, CONSTRUCCIÓN Y CARACTERIZACIÓN DE TRANSDUCTORES DE ULTRASONIDO PARA ENSAYOS NO DESTRUCTIVOS". Tesis de grado. Universidad Autónoma de Occidente. 2012.
- PEREZ DÍAZ, A. et al. "Ultrasonic transducers: From analytical modelling to design optimisation and validation" ERASMUS MUNDUS MASTER IN COMPLEX SYSTEMS SCIENCE. Junio de 2014.
- ABAS, A.A. et al. "EFFECT OF BACKING LAYER COMPOSITION ON ULTRASONIC PROBE BANDWIDTH". IAEA INIS journal. 2010.
- LOW, G.C., JONES R.V. "Design and construction of short pulse ultrasonic probes for nondestructive testing". Ultrasonics. 1984.
- AMINI, M.H. "DESIGN AND MANUFACTURE OF AN ULTRASONIC TRANSDUCER FOR LONG-TERM HIGH TEMPERATURE OPERATION". Tesis doctoral. 2016.
- RUBIO C., MARRERO O." Fabricación de Transductores Ultrasónicos para Equipos Automatizados de inspección de líneas de Tuberías". NDT NET. 2010
- RAMADAS S.N., O'LEARY R.L., GACHAGAN A. "Ultrasonic Sensor Design for NDE Application: Design Challenges & Considerations". Proceedings of the National Seminar & Exhibition on Non-Destructive Evaluation. Diciembre de 2009.

INFLUENCIA DO SISTEMA DE CONTROLE DA CARGA EM ENSAIOS DE EMISSÃO ACÚSTICA: ESTUDO TEÓRICO

Almeida W. R.^{ab}, Rojo Tanzi B. N.^a e Iturrioz I.^a

^aGrupo de mecânica aplicada, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, BRASIL

^bUniversidade Federal de Rio Grande, Rio Grande, BRASIL

e-mail: eng.williamalmeida@gmail.com

RESUMO

Monitorar a utilização de estruturas feitas de materiais que apresentam comportamento quasi-frágil, como concreto, rochas e cerâmicas utilizando a técnica da emissão acústica tem sido de grande utilidade pois este tipo de material se danifica produzindo uma sucessão de rupturas localizadas que produzem atividade acústica que pode ser registrada. O estudo das características do registro de emissão acústica gerado fornece informação sobre como e quando o sistema estudado vai colapsar. No caso específico do estudo de corpos de prova em laboratório a forma de realizar o ensaio influencia o tipo de resposta esperado. Se a ruptura é abrupta a informação obtida ao registrar a emissão acústica é prejudicada por não ser possível registrar uma sucessão de eventos que neste caso irão se sobrepor, dificultando a sua interpretação. No estudo a ser apresentado um carregamento controlado é aplicado e confrontado com o mesmo caso, sem realizar o controle do carregamento, estudando os resultados obtidos em termos da emissão acústica registrada. Para realizar este estudo, serão utilizados modelos de corpos de prova simples, implementados numa versão do método dos elementos discretos que permite representar o sólido como um arranjo regular de nós, vinculados por funções de interação que geram uma rigidez equivalente ao domínio que pretendem representar. Estas funções de interação entre nós são do tipo não linear e permitem simular a ruptura e fragmentação em forma consistente. Trabalhos anteriores dos autores têm ilustrado que a aplicação de métodos discretos permite simular o processo de ruptura em materiais quasi-frágeis e as características dos registros de emissão acústica obtidos são similares aos obtidos experimentalmente. Com o auxílio desta ferramenta numérica é possível estudar como o comportamento dos corpos de prova analisados mudam em função de diferentes tipos de controle na aplicação da carga.

Palavras chave: Método dos elementos discretos, materiais quasi-frágeis, controle de carga

1. INTRODUÇÃO

Os mecanismos que governam a nucleação e a propagação de trinca são regidos por características mesoscópicas, intrínsecas do material e ou do processo de fabricação ao qual este foi submetido. Representar o fenômeno da fratura é atualmente um dos maiores desafios devido a sua complexidade.

Em materiais quase frágeis a propagação de fissuras é precedida por uma nuvem de microfissuras que vai se adensando até produzir-se uma localização que resulta numa fissura principal. Como esta nuvem de microfissuras evolui em intensidade e características relacionadas a anisotropia que produz esta interação resulta em fenômenos difíceis de avaliar analiticamente ou com modelos numéricos clássicos baseados nos meios contínuos como o método dos elementos finitos.

A teoria clássica dos meios contínuos apresenta limitações para representar meios descontínuos pois o deslocamento relativo e a força entre dois pontos materiais são representados por derivadas parciais e estas não podem ser definidas na presença de singularidades. (Aguiar, 2014). Esta limitação da teoria clássica dos meios contínuos se reflete em dificuldades ao utilizar o método dos elementos finitos para simulação deste tipo de situação. Entre as formas de contornar este problema se podem citar o método das interfaces coesivas, proposto por Xu e Needleman(1994), onde é feita a inserção de interfaces coesivas entre os elementos, se as forças de tração aplicadas nestas interfaces ultrapassarem a resistência do material os elementos se separam permitindo assim modelar a fratura e fragmentação. A principal limitação deste método se deve à restrição da adição de elementos coesivos somente às interfaces entre os elementos, isto gera a introdução de uma flexibilidade adicional no modelo. Já Belytschko et al.(2003), propõe que problemas que envolvem pontos de singularidade do meio devem ser modelados através da adição de um conjunto de funções base às funções de interpolação, método conhecido como elementos finitos estendido (XFEM).

A mecânica dos meios descontínuos surge como uma alternativa para a simulação deste tipo de problema. Pois propõe que o material seja representado como um conjunto de nós, interligados por leis de interação não lineares. O surgimento de descontinuidades é feito através da degradação das interações conforme a excitação sofrida pela estrutura.

Diversas versões do método dos elementos discretos podem ser citadas, dentre elas as versões de Chiaia et. Al (1997), Rinaldi (2007), Riera (1984) e a teoria peridinâmica, proposta por Silling(2000) e utilizada neste trabalho.

2. METODOLOGIA

2.1 Teoria Peridinâmica

Esta metodologia propõe a reformulação das equações de movimento da mecânica dos sólidos. Porém, uma grande vantagem deste método é que ele utiliza equações integrais espaciais, permitindo sua aplicação em corpos que possam apresentar descontinuidades durante a simulação.

O princípio da teoria peridinâmica consiste em dividir um meio contínuo em pontos materiais, atribuindo a estes pontos coordenadas em um plano cartesiano e frações do volume do corpo. Ao contrário da mecânica dos sólidos, que considera que um ponto

interage somente com os seus pontos adjacentes, a teoria peridinamica considera que um ponto pode interagir com diversos pontos ao seu redor, não necessariamente adjacentes.

O movimento do corpo é determinado resolvendo estas equações integrais que permitem definir a posição de cada ponto definida pelo seu vetor posição $x_{(k)}$ que interage com outros pontos $x_{(j)}$ com $j = 1, 2, 3, \dots, \infty$, entretanto, pode haver uma grande quantidade de interações entre o ponto $x_{(k)}$ e outros pontos localizados no corpo. Contudo, se assume que a influência dos pontos materiais que interagem com o ponto $x_{(k)}$ desaparece além de uma região local chamada $H_{x_{(k)}}$, conforme pode ser visto na Fig. 1. O raio que delimita esta região é chamado de horizonte (δ).

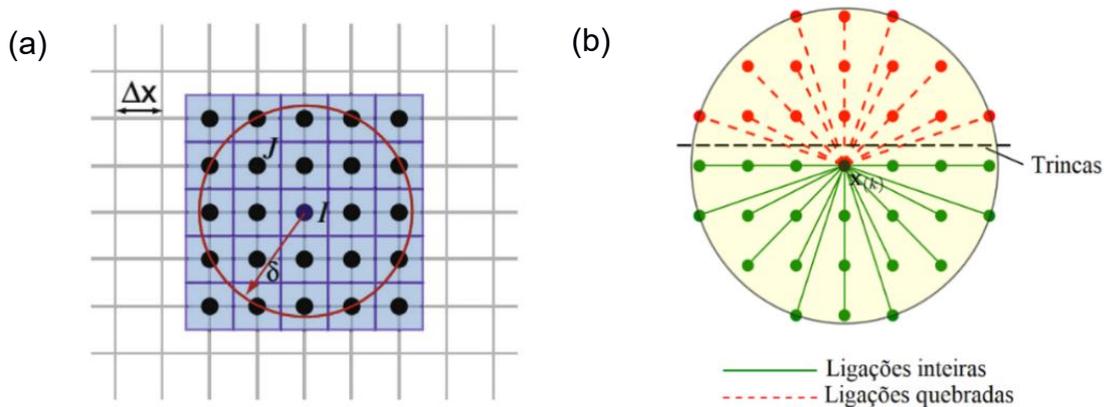


Figura 1: (a) Modelo de contínuo discretizado em pontos e sua família H_x , (b) Exemplo de dano na teoria peridinâmica. (Adaptado de: Madenci e Oterkus, 2014).

Existem diferentes abordagens da teoria, a mais tradicional, chamada de *bond-based*, foi apresentada por Silling *et al* (2007) consiste em usar um vetor, função de força f para representar a interação entre dois pontos materiais. A equação do movimento é dada por:

$$\rho \ddot{u}(x_{(j)}, t) = \int_{H_x} f(u(x_{(k)}, t) - u(x_{(j)}, t), x_{(k)} - x_{(j)}) dV_{x'} + b(x_{(j)}, t) \quad (2.1)$$

Onde $H_{x_{(k)}}$ é a família do ponto x , em análise, u é o vetor de deslocamentos, b é a força de corpo prescrita ρ é a densidade e f é o vetor de força que representa a força de ligação entre o ponto x e o ponto x' .

2.2 Critério de dano

Na teoria peridinamica o critério de dano consiste em desativar a ligação entre os pontos assim que o alongamento $s_{(k)(j)}$ entre dois pontos $x_{(k)}$ e $x_{(j)}$ excede o valor crítico dado por s_c , chamado de alongamento crítico. A desativação da ligação consiste em remover o vetor de densidade de força f , que ocorre entre os pontos $x_{(k)}$ e $x_{(j)}$, na equação de movimento. A consequência desta remoção é a redistribuição do carregamento entre as outras ligações com os demais pontos. Isto causa um crescimento autônomo e progressivo do dano, como pode ser visto na fig. 2 (Silling e Askari, 2005).

A posição relativa de dois pontos na posição de referência é dada por $\xi = x_{(j)} - x_{(k)}$ e o deslocamento relativo dos pontos é dado por $\eta = u(x_{(j)}, t) - u(x_{(k)}, t)$, alongamento $s_{(k)(j)}$ entre dois pontos $x_{(k)}$ e $x_{(j)}$ é apresentado na equação (2.2).

$$s_{(k)(j)} = \frac{|\xi + \eta| - |\xi|}{|\xi|} \quad (2.2)$$

$$s_0 = \sqrt{\frac{5G_f}{9k\delta}} \quad (2.3)$$

O alongamento crítico é apresentado na equação (2.3). Nesta expressão G_f representa a tenacidade do material, k o módulo de compressibilidade e δ o horizonte do modelo. Existem diferentes referências na literatura para o valor máximo de s_0 , no presente trabalho foi adotada a proposta por Bobaru *et al* (2017).

2.3 Introdução de pseudo-aleatoriedade na teoria peridinamica

Para fazer com que a simulação apresente um comportamento próximo ao de um material real faz-se necessário incluir a natureza aleatória das propriedades do material considerado. Para este trabalho se considera como campo aleatório a energia de fratura do material, variável definida com uma distribuição de Weibull e com um valor médio e coeficiente de variabilidade. A distribuição espacial do campo aleatório de G_f é definida neste caso considerando em cada ligação um valor aleatório independente, outras formas de considerar esta correlação podem ser vistas em Cabral *et al* (2019).

2.4 Introdução do sistema de controle PID

O propósito de um sistema de controle é manter a resposta de um domínio de controle dentro de certos limites de comportamento, existe um considerável desenvolvimento teórico realizado neste sentido, o qual é aplicado nos mais variados campos da engenharia, uma das referências nesta área é Ogata (2000). Na aplicação realizada será utilizado um sistema de controle em malha fechada, ou seja, o sinal de entrada é determinado considerando o sinal desejado e a resposta do sistema ao sinal de entrada anterior.

A retroalimentação permite manter o parâmetro que está sendo controlado próximo ao valor desejado mesmo com a ocorrência de distúrbios e variações no processo, a diferença entre o valor desejado deste parâmetro e o valor obtido em cada etapa do processo é chamada de erro $e(t)$.

A forma de controle utilizada é do tipo Proporcional-Integral-Derivativo (PID), onde a etapa proporcional, é responsável por produzir um sinal de saída proporcional a amplitude do erro $e(t)$. Já a etapa integral, gera um sinal de saída proporcional ao erro acumulado. Por último tem-se a etapa derivativa, que é baseada em valores futuros previstos para o erro, sendo relacionada com a velocidade de variação deste. Sendo K_p , K_i , K_d as constantes de proporcionalidade, integrativa e derivativa respectivamente. A

equação (2.3) apresenta o sinal de saída, que neste caso seria uma correção da velocidade de deslocamento aplicada $\Delta\alpha(t)$, para um controlador PID. Detalhes sobre as propriedades de cada um dos controles podem ser encontrados em várias referências, entre elas (Visioli, 2006). A equação (2.3) permitirá controlar a resposta da estrutura durante o ensaio. A relação entre as constantes K_p , K_i , K_d permite realizar um controle ótimo do sistema estudado.

$$\Delta\alpha(t) = K_p e(t) + K_i \int_0^t e(\tau) d\tau + K_d \frac{de(t)}{dt} \quad (2.3)$$

2.5 Emissão Acústica

Uma forma de obter informação sobre a forma como os materiais rompem consiste na captura, através de sensores colocados na superfície da estrutura analisada, das acelerações produzidas nestes pontos. Alguns materiais ao se danificar produzem instabilidades internas que resultam em ondas elásticas que podem ser capturadas pelos sensores superficiais, os chamados de eventos de emissão acústica. A distribuição dos eventos no tempo e a amplitude e forma dos mesmos fornecem informação sobre como e quando a estrutura em análise pode romper. Existe uma extensa bibliografia sobre o tema, dentre as quais podemos citar Othsu e Grosse (2009). Os métodos dos elementos discretos permitem capturar as ondas produzidas pelas rupturas internas que podem ser associadas a eventos de emissão acústica, a este respeito pode ser citado o trabalho de Birck et al 2016, entre outros.

3. Aplicação

3.1 Modelo Físico

O problema a ser estudado consiste em um corpo prismático de concreto com dimensões 32x40x3mm, com propriedades mecânicas definidas por modulo de elasticidade igual a 32GPa, coeficiente de Poisson igual a 0.25, densidade igual a 2400Kg/m³ e coeficiente de tenacidade a fratura de 100N/m. O domínio indicado foi fixado na direção vertical na borda superior e são aplicados deslocamentos prescritos na borda inferior.

3.2 Descrição do Modelo Numérico

O modelo numérico foi realizado com uma malha de 31 x 39 x 3 nós, considerando um horizonte de $\delta = 3 * \Delta x$, considerando $\Delta x = 1\text{mm}$. A lei constitutiva utilizada para cada bond, (ligação entre os nós do modelo) é linear até a deformação crítica s_0 ser alcançada. Após o valor de s_0 ser atingido o bond perde totalmente a condições de resistir carga. O deslocamento s_0 de cada bond é uma variável aleatória vinculada a tenacidade conforme explicado em 2.3.

Na direção da espessura foram considerados somente três nós, fixando os deslocamentos do modelo nesta direção (z no sistema de coordenadas indicado na figura 2, desta forma simulando um estado plano de deformações).

O modelo simulado e as condições de contorno do problema são representadas na figura 2. Cabe salientar que para a correta aplicação das condições de contorno, não

uma fileira de nós, mas sim quatro fileiras de nós são prescritas, tanto na parte superior quanto na parte inferior (regiões dentro do quadrado preto na fig 2). Isto se deve ao fato do horizonte utilizado ser $\delta = 3 * dx$.

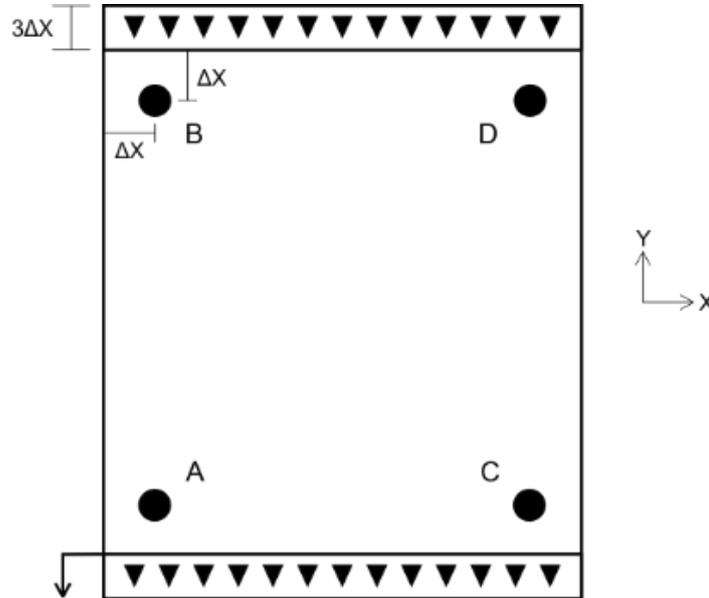


Figura 2: Diagrama do modelo utilizado na simulação com indicação das regiões onde foram lidos os deslocamentos e pontos onde foram captadas as emissões acústicas.

No modelo foram medidos os deslocamentos verticais em quatro pontos indicados como A, B, C e D. A posição destes pontos é indicada na fig 2. Os deslocamentos medidos nestes pontos serviram como informação para definir o controle sobre o deslocamento prescrito na borda inferior do modelo simulado.

O deslocamento da borda inferior do modelo será definido pela expressão:

$$u(t) = \alpha(t) x t \quad (2.4)$$

Onde $\alpha(t)$ é definido por:

$$\alpha(t) = \alpha_0 + \Delta\alpha(t) \quad (2.5)$$

Sendo $\alpha_0 = 0,0217$ m/s enquanto a resposta do modelo seja linear. O coeficiente $\alpha(t)$ sofrerá alteração quando a velocidade do deslocamento nos pontos A, B, C ou D sofrer acréscimo significativo, neste caso o controle do deslocamento é ativado e a correção indicada pela expressão (2.3) é aplicada, alterando o valor de $\alpha(t)$.

Os parâmetros $K_p = 40$, $K_i = 160$ e $K_d = 6 \times 10^{-6}$ foram determinados seguindo a seguinte metodologia:

1. Efetua-se o ajuste de K_p , buscando o parametro que apresente um resultado satisfatório
2. Efetua-se o ajuste de K_i , com K_p já implementado.
3. Efetua-se o ajuste de K_d , considerando K_i e K_p já implementados.
4. São feitos ajustes em K_p e K_i .

Os parâmetros indicados são constantes durante toda a simulação.

4. RESULTADOS

O primeiro resultado obtido, apresentado na fig. 3, são os deslocamentos verticais dos quatro pontos de medição durante o ensaio. Cabe aqui salientar que o tempo foi normalizado em relação ao tempo no qual se atinge a carga máxima quando nenhum controle na forma de aplicar a excitação é realizado.

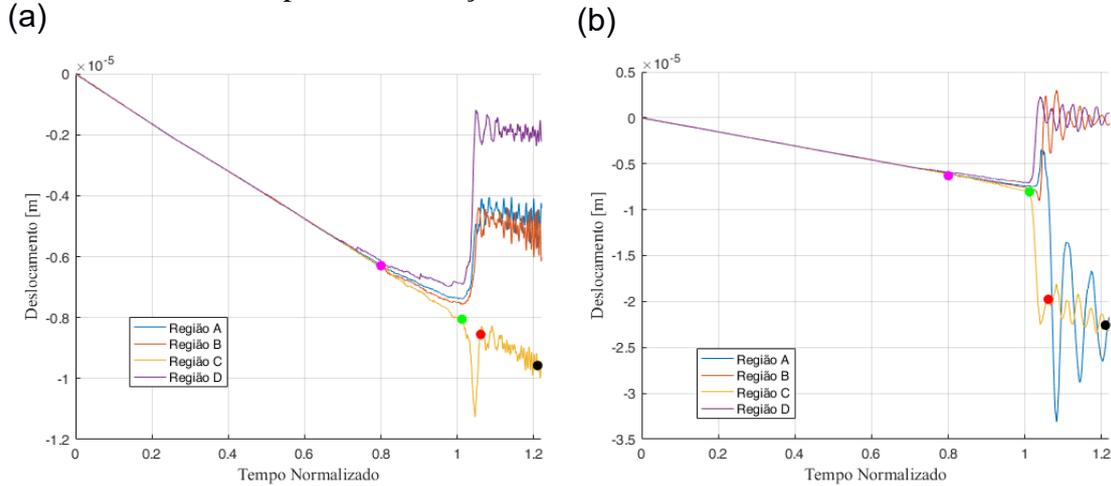


Figura 3: Deslocamentos nos quatro pontos de controle, (A, B, C e D). (a) com controle, (b) sem controle.

Na Fig. 4 é apresentada a resposta em termos de tensão global vs tempo em (a) e vs deformação em (b). O registro de quando foi realizado o controle da velocidade dos deslocamentos e quando este controle não é realizado estão superpostos.

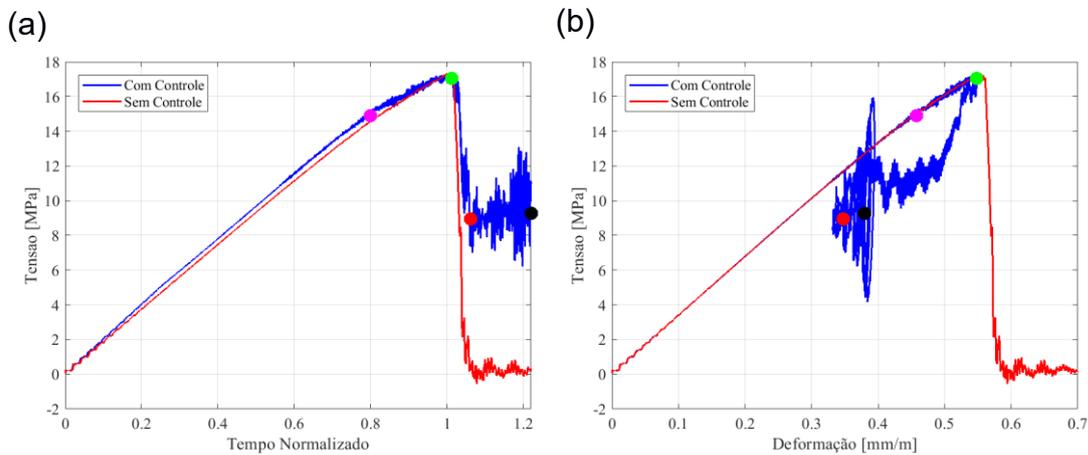


Figura 4: Resultados em termos de (a) tensão vs tempo, (b) tensão vs deformação aplicada. A resposta quando foi realizado o controle e quando o mesmo não é realizado estão superpostas. O tempo foi normalizado em relação ao instante em que a ruptura acontece na situação sem controle. Os pontos rosa, verde, vermelho e preto, marcam instantes característicos durante a simulação.

Os resultados em termos de balanço de energia são apresentados na fig. 5a para a simulação onde houve atuação do sistema de controle e na fig. 5b para a simulação sem atuação do sistema de controle.

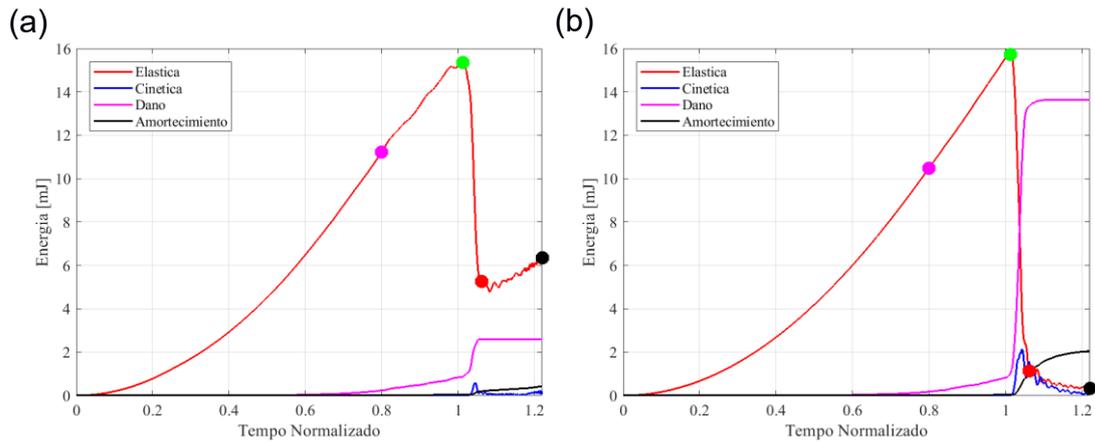


Figura 5: Balanço de energia para a simulação nas simulações (a) com controle, (b) sem controle.

O monitoramento da distribuição espacial do dano permitiu verificar que a nucleação de uma fissura ocorreu na zona de influência do ponto C. A evolução do crescimento da fissura na simulação onde o sistema de controle foi aplicado foi bem mais lenta, como pode ser visto comparando as figs 6(a) e 6(b).

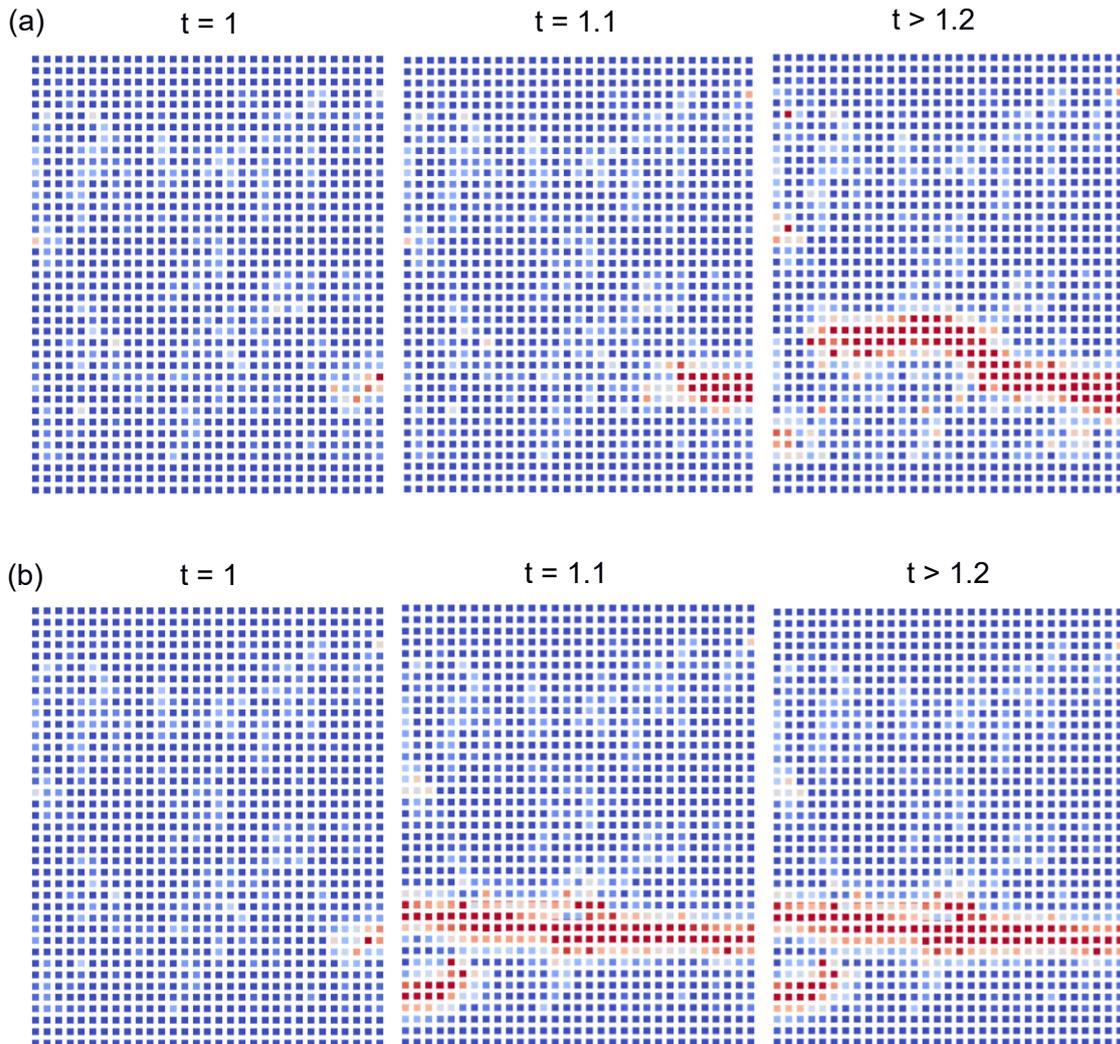


Figura 6: Representação do dano causado ao corpo de prova (a) com controle e (b) sem controle.

4.1 Emissão Acústica

Resultados preliminares dos registros de emissão acústica são apresentados com o sistema com controle em Fig. 7(a) e sem controle na (b).

Nos dois casos os resultados são apresentados em termos do registro de acelerações realizado, em termos de número de eventos acumulados e em termos das amplitudes de cada evento.

É possível observar que no caso de realizar o controle da excitação a emissão acústica teve uma distribuição diferente. Não foram identificados muitos eventos devido ao valor do corte para identificar um evento foi alto, mas o aspecto geral da assinatura mostra que quando se realiza o controle da carga uma maior atividade acústica acontece na ruptura e também podem ser individualizados eventos após a ruptura principal.

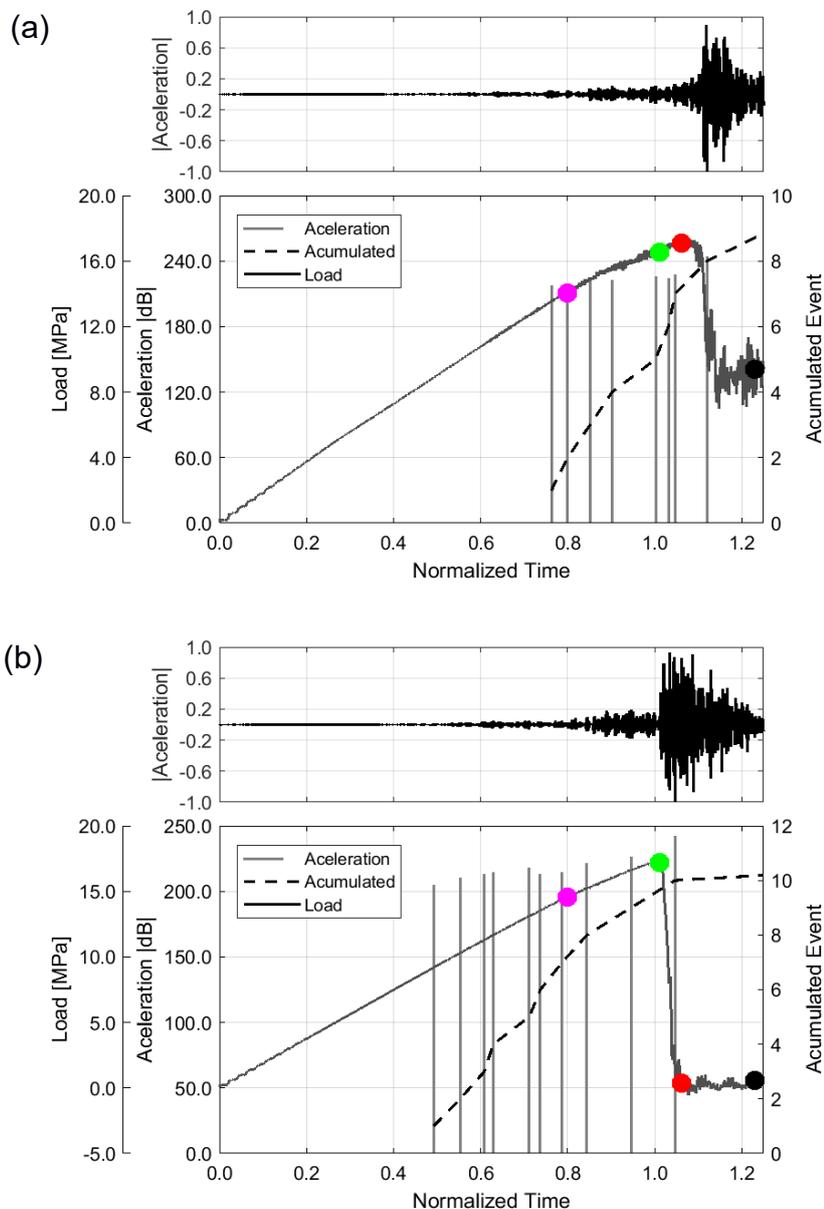


Figura 7: (a) Dados de emissão acústica obtidos com atuação do controle de deslocamento e (b) dados obtidos sem o controle do deslocamento.

5. CONCLUSOES

Neste trabalho foi verificado a viabilidade de se adicionar, nas simulações realizadas no modelo de Peridinamica, um mecanismo de controle ao deslocamento de regiões onde ocorram a nucleação e propagação de trincas, com o objetivo de controlar a sua velocidade de abertura e relacionar a evolução do processo de dano em condições controladas com o registro da emissão acústica.

A partir da implementação feita foi possível chegar à conclusão que:

1) É possível estabelecer um sistema que monitore e controle o deslocamento de regiões onde ocorrem a nucleação e propagação de trincas e evite a ruptura abrupta, causando a sobreposição de eventos, a implementação deste sistema em um modelo numérico servira de subsídio para realizar o mesmo em ensaios.

2) Para que este sistema forneça resultados que possibilitem uma análise de emissão acústica detalhada, ainda são necessárias melhorias no sistema de controle, como por exemplo a implementação de filtros, visando evitar oscilações bruscas no deslocamento, que podem emitir ondas mecânicas captadas pelos sensores.

3) Os parâmetros K_p , K_i e K_d foram determinados com base na metodologia descrita no item 3.2. Estima-se que a aplicação de outras metodologias de ajuste como a proposta por Ziegler-Nichols(1942) ou da sintonia através de um modelo do sistema Astrom (1995) permitam obter um melhor ajuste dos parâmetros. Não foi considerada a possibilidade de variar os parâmetros durante o processo, isto seria outro das modificações que poderiam ser avaliadas em futuros trabalhos.

AGRADECIMENTOS: Os autores agradecem o apoio do professor Daniel De Leon, da Universidade Federal do Rio Grande do Sul – UFRGS, da Universidade Federal de Rio Grande –FURG, Capes, CNPq e ao centro de supercomputação da UFRGS - CESUP, que fazem possível a continuação das pesquisas e a melhora continua profissional.

REFERENCIAS

- Astrom K. J., Hagglund, T. PID controllers: theory, design, and tuning. Instrument Society of America. Research Triangle Park, NC. 1995
- Aguiar, A. D. (2014). Uma contribuição ao desenvolvimento da teoria peridinâmica, tese de livre docente em engenharia de estruturas, Universidade de São Paulo. São Carlos, SP.
- Belytschko T, Chen H, Xu J, Zi G. Dynamic crack propagation based on loss of hyperbolicity with a new discontinuous enrichment. *Int J Numer Methods Eng* 2003;52:1873-905
- Birck, G., Iturrioz, I., Lacidogna, G., Carpinteri, A., Damage process in heterogeneous materials analyzed by a lattice model simulation. *Engineering Failure Analysis*, v. 70, p. 157-176, 2016
- Bobaru, F. Foster, J. T. Geubelle, P. H., Silling S. A., *Handbook of Peridynamic Modelling*. Chapman and Hall/CRC, Florida. 2017.
- Cabral, N. R., Invaldi, M. A., D'Ambra, R. B., Iturrioz, I., An alternative bilinear peridynamic model to simulate the damage process in quasi-brittle materials, *Engineering Fracture Mechanics*. 2019
- Chiaia B. et al. Lattice model evaluation of progressive failure in disordered particle composites, *Engineering Fracture Mechanics*, v. 57, n°. 2/3, p. 301-318, 1997.
- Grosse, C. U., Ohtsu, M. *Acoustic emission testing*. Springer. 2009.
- Ogata, K. *Engenharia de Controle Moderno: Terceira Edição*. LTC. Rio de Janeiro. 2000.
- Riera, D. Local Effects In Impact Problems In Concrete Structures. In: proceedings, Conf. on Structural Analysis & Design of Nuclear Power Plants, UFRGS, 1984. Porto Alegre, 1984.
- Riera, J.D., Local Effects In Impact Problems In Concrete Structures. Em: proceedings, Conf. on Structural Analysis and Design of Nuclear Power Plants, UFRGS, 1984. Porto Alegre, Rs, Brasil. p. 0-0. 1984.
- Rinaldi A. E Lai Y.C. Statistical damage theory of 2D lattices: Energetics and physical foundations of damage parameter, *International Journal of Plasticity*, v. 23, p.1769-1825, 2007.
- Silling, S. A. Reformulation of elasticity theory for discontinuities and long-range forces, *Journal of the Mechanics and Physics of Solids* 48, p. 175-209. 2000.
- Silling, S. A., Epton, M., Weckner, O., Xu, J. e Askari, E., Peridynamic states and constitutive modeling. In: *Journal of elasticity* 88, n. 2, p. 151–184. 2007.
- Silling, S.A. e Askari, E., A meshfree method based on the peridynamic model of solid mechanics. *Comput. Struct.* V. 83 (17), p.1526-1535. 2005.
- Visioli, A., *Practical PID Control*. Springer. Italy. 2006.
- Ziegler, J.G. Nichols, N. B. Optimum settings for automatic controllers. *Transactions of the ASME*. 64: 759–768. 1942.

REDES NEURONALES APLICADAS AL MONITOREO DE PROCESOS DE PERFORACIÓN EN PROBETAS DE MATERIAL GEOLÓGICO

Basgall A.^a, Ferrari, G.^a, Gómez, M. ^{a,b}

^a Grupo de Emisión Acústica, Facultad Regional Delta, Universidad Tecnológica Nacional, San Martín 1171, Campana, Buenos Aires, ARGENTINA.

^b Grupo de Ondas Elásticas – Proyecto ICES, Comisión Nacional de Energía Atómica, Av. Gral. Paz 1499, San Martín (1650), Buenos Aires, ARGENTINA.

e-mail: angelbasgall@hotmail.com

RESUMEN

Una Red Neuronal Artificial (RNA) es un modelo matemático computacional que intenta imitar, limitadamente, la estructura y funcionamiento de neuronas biológicas las cuales, a grandes rasgos, toman señales eléctricas de entrada y producen una señal de salida llamada respuesta. Mediante la combinación de una cantidad grande de neuronas artificiales, estas pueden tener la capacidad de “aprender” patrones específicos en el análisis de señales e inferir resultados. Estas redes pueden ser utilizadas en una amplia gama de aplicaciones como clasificación de objetos o señales, aproximación de funciones, conducción autónoma, reconocimiento de voz, análisis y tratamiento de imágenes o textos, etc. Las RNA tipo mapa auto-organizado (SOM Self Organized Map) o también llamadas Redes Kohonen realizan una suma ponderada de los datos multidimensionales de entrada, los cuales son afectados individualmente por un valor numérico denominado peso. Luego mediante una competencia entre neuronas se selecciona una ganadora y se procede a realizar un ajuste de vecindad para que la señal de salida sea más parecida a la señal de entrada. Esto genera un mapa en dos dimensiones donde la información se muestra organizada en zonas que tienen características similares. Los pesos de cada neurona se modifican continuamente y de diferente manera durante varias “épocas” (época se denomina a cada paso de ajuste de los pesos) hasta minimizar el error de la respuesta. Este proceso se denomina entrenamiento, donde específicamente para esta red, es un aprendizaje de tipo no supervisado. En este trabajo se utilizan RNA tipo SOM para el estudio de señales emisión acústica (EA) provenientes de un proceso perforación de materiales geológicos dispuestos en capas y asociados mediante un cementicio, con los cuales se construyeron probetas de tamaño de laboratorio (320x320x400 mm). El taladrado se realizó con brocas de 65 mm de diámetro, con insertos monofilo de carburo de tungsteno, haciendo cuatro agujeros por cada probeta multicapa, y se midió la EA durante cada perforación. Luego de un proceso de entrenamiento detallado y una selección rigurosa de la información, esta RNA mostró la capacidad de reconocer las diferentes capas de cada probeta a partir del procesamiento de las señales de EA obtenidas durante el proceso de perforación.

Palabras Clave: Redes Neuronales, Emisión Acústica, Taladrado, Rocas.

1. INTRODUCCIÓN

Una Red Neuronal Artificial (RNA) es un modesto modelo matemático computacional basado en sus homologas biológicas, las cuales reciben impulsos eléctricos en sus dendritas (entrada) que luego son procesados en el organismo (cuerpo de la neurona) y producen un impulso eléctrico que viaja por el axón (salida) y se conecta con dendritas

de neuronas próximas través de neurotransmisores químicos (peso) que modulan la señal. [Beale et al. 2020] [Zupan y Gasteiger, 1993].

Una vez planteado un modelo matemático que modeliza las funciones básicas de una neurona biológica individual, podemos combinar una gran cantidad de estas hasta adquirir la capacidad de “aprender” patrones específicos e inferir resultados. Estas redes pueden ser utilizadas en aplicaciones como conducción autónoma [Yáñez-Badillo H., 2017] [Faheem, 2013], análisis y tratamiento de imágenes (Su, 2019), y otras [Boldsaikhana, 2011] [Fratini, 2009].

En el presente trabajo se utilizó una RNA tipo mapa auto-organizado o de Kohonen [Kohonen, 2001]. Esta red se caracteriza por tener un aprendizaje no supervisado, lo que significa que la red se ajusta automáticamente a los valores de entrada sin ningún tipo de estimulación positiva o negativa por parte del usuario. Este tipo de red brinda como resultado un mapa de dos dimensiones independiente de la cantidad de parámetros de entrada. Una red neuronal tipo Kohonen realiza un escalado multidimensional a bidimensional. Sobre el mapa resultante se muestran las neuronas que determinan zonas de similitud, de las que se puede analizar la topología, es decir, la distribución de la información con características semejantes. De esta forma, se llega a una forma de más fácil interpretación para un observador.

Este tipo de RNA contiene gran cantidad de parámetros a ser definidos, con el objetivo de lograr un correcto aprendizaje de los patrones existentes en el conjunto de datos. Aspectos importantes para considerar mínimamente a la hora de “diseñar” y optimizar una RNA del tipo Kohonen comprenden el tipo de aprendizaje, la cantidad de neuronas (que al ser de una sola capa se expresa como una matriz de $M \times N$), la forma en la corrección de pesos, la topología, la geometría de la red y las épocas de entrenamiento. Una de las formas de definir una regla de aprendizaje de la información se logra comparando las salidas de todas las neuronas con el dato de entrada y definiendo como “neurona ganadora” la que tenga el peso más parecido al dato ingresado. Una vez seleccionada la neurona ganadora se procede a ajustar los pesos de esa neurona y de sus vecinas para que se asemejen más a esa clase de datos. La función de corrección de los pesos de la neurona y su vecindad es la forma en la que se distribuye un factor de ajuste en cada neurona, generalmente este valor tiene una corrección alta en la ganadora y decrece al alejarse de esta. Las funciones más comunes de ajuste pueden ser constantes, gaussianas, lineales, etc.

La topología se define como la forma en la que cada neurona interactúa con sus vecinas, definiendo la cantidad de comunicaciones individuales. Esto se puede observar en la Fig. 1 donde se representan diferentes arreglos que varían la cantidad de vecinos de una neurona.

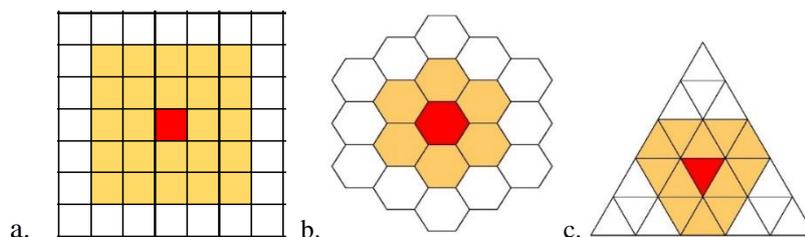


Fig. 1. a. Distribución ortogonal, b. Distribución Panal de abeja, c. Distribución Triangular.

La geometría de una red establece el comportamiento de la vecindad cuando está dentro de los límites. Esta puede modelizarse en forma plana, tubular o toroidal (Fig. 2 a, b, c) que luego es representada en un mapa de dos dimensiones como se puede observar en la vista planar de la Figura 3 para una geometría tubular y otra toroidal.

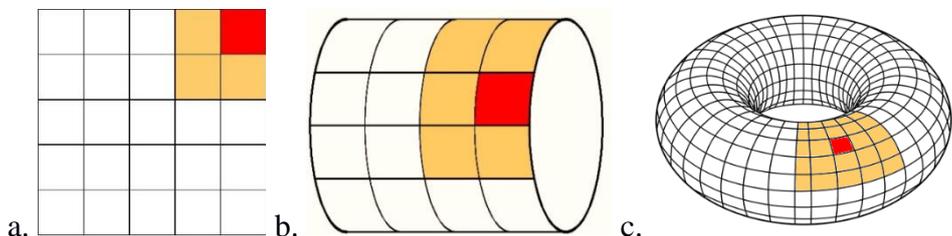


Fig. 2. a. Geometría Plana, b. Geometría Tubular, c. Geometría Toroidal.

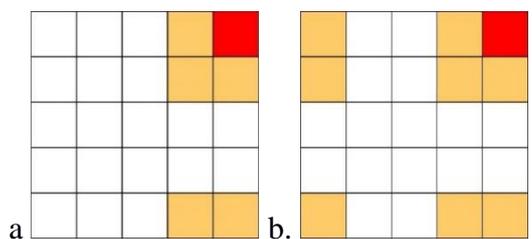


Fig. 3. Vista planar de a. Geom. Tubular, b. Geom. Toroidal.

Por último, una época se define cuando todo el lote de datos ha ingresado en la red. Habitualmente se deben realizar muchas épocas de entrenamiento para que los pesos se ajusten teniendo cuidado de no sobre-entrenar la red. En cada época se mide el error como distancias vectoriales, ya sean euclideas, Minkowski, Tanimoto, Mahalanobis, etc; que expresan la diferencia entre los valores de entrada y salida de la red. Adicionalmente se puede calcular el error de mezclado, que se produce cuando un dato de una clase es clasificado por una neurona que anteriormente reconoció un dato de otra clase. Esto último, solo se puede hacer si previamente se etiquetaron los datos de las diferentes clases.

La técnica de Emisión Acústica (EA) está basada en el monitoreo de ondas elásticas que se producen en un material y se propagan por ese medio físico. En general es producida por una sollicitación del material. Esta onda puede ser detectada y adquirida mediante un transductor piezoeléctrico que transforma el movimiento de la superficie del material en una señal de voltaje proporcional a la energía de la onda. En este proceso, la señal de EA es digitalizada, parametrizada y finalmente analizada. Con el fin de economizar cálculos y recursos de cómputo se extrae la información más relevante de las ondas, mediante parámetros característicos que permiten describirla. Estos, en general, se definen a partir del cruce por primera y última vez de un umbral definido por el operador con el fin de separar la señal del ruido. Esta porción de señal se denomina hit o golpe de EA. Algunos de los parámetros característicos de la EA son la amplitud (expresada en dB), el número de cuentas, la duración, el valor cuadrático medio (“rms”), el tiempo de subida (“rise time”) y otros. El valor cuadrático medio (“RMS”) es una medida de la energía que contiene la señal, además tiene la ventaja de suavizar pequeños cambios en la ganancia del sistema electrónico o en el acoplamiento del transductor. Se calcula mediante la ecuación:

$$V_{ef} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_{t_0}^{t_0+T} v^2(t) dt} \quad (1)$$

La energía absoluta es la integral en el tiempo del cuadrado de la señal de EA, dividida por la resistencia de entrada del preamplificador. Este parámetro calcula la energía eléctrica a la salida del sensor la cual se relacionará a la energía elástica generada por el fenómeno escuchado.

$$E_e = \frac{1}{R} \int [V(t)^2] dt \quad (2)$$

El número de cuentas es la cantidad de veces que la señal cruza el umbral durante el tiempo de duración del hit. El tiempo de subida (“rise time”) es el lapso desde que la señal cruza el umbral hasta que el hit alcanza su amplitud máxima. La amplitud es el valor máximo en módulo de la tensión de la señal de EA. Este valor está relacionado con la magnitud de la fuente y propiedades del material. En general se expresa en decibeles (dB_{EA}) dado que la variación en mV es de varios órdenes.

Se calcula mediante la ecuación:

$$A(\text{dB}_{EA}) = 20 \log \frac{V_p}{V_{ref}} \quad (3)$$

Estos parámetros o descriptores de la EA se pueden definir como vectores de información que eventualmente pueden ser utilizados como información de entrada para entrenar y simular una RNA con la capacidad de reconocer las diferentes señales de EA durante el monitoreo de un proceso.

Existe bibliografía que relaciona la utilización de RNA y señales de EA, en diferentes campos de aplicación como la clasificación de estado de herramientas, así como la rugosidad final obtenida en procesos de desbaste [Kwak, 2004], Caracterización de procesos de soldadura por fricción [Jiménez Macías, 2013], monitoreo en procesos de manufactura aditiva [Shevchik, 2018], monitoreo en línea del desgaste de herramientas [Sick, 2002], predicción de características mecánicas en procesos de taladrado de rocas [Kumar, 2013], predicción de tensión de producción de falla en material compuesto [Kumar, 2017], inferir índice de abrasión se rocas [Pérez, 2015], monitoreo en procesos de desbaste, entre muchos otros.

En el presente, se utilizó una RNA tipo Kohonen para clasificar los patrones característicos de EA correspondientes a un proceso de taladrado sobre materiales rocosos. Luego de seleccionar parámetros de EA y diseñar la arquitectura de la RNA se obtuvieron mapas de clasificación que permiten distinguir las diferentes capas de los diferentes materiales geológicos.

2- DESARROLLO EXPERIMENTAL

2.1 Construcción de probetas

Las probetas se realizaron depositando capas de diferentes rocas unidas con cemento. Todas las probetas tienen las mismas dimensiones, varía el grosor y tipo de roca de cada

capa intermedia. Están diseñadas para permitir 4 perforaciones en una misma probeta (ver Fig. 4)

Las rocas utilizadas para este trabajo son arenisca y lutita (Caliza). El elemento cementicio está conformado por 3 partes de arena, 0.8 de cemento y 0.2 de cal.

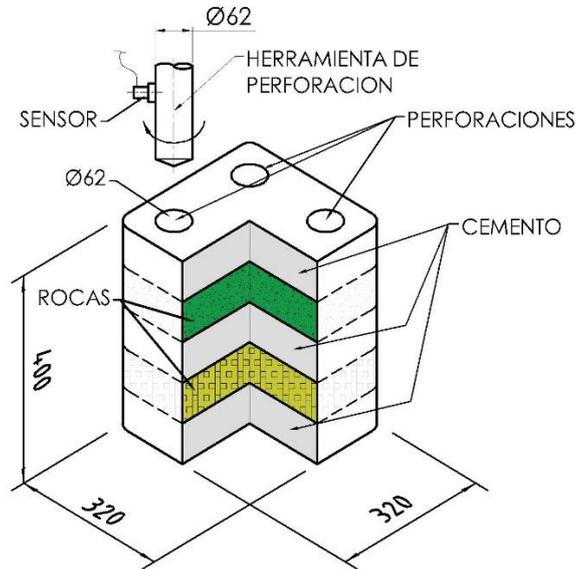


Fig. 4. Montaje experimental (Probeta A2AC2 ver Tabla 1).

Para la realización de este ensayo se utilizaron probetas con las composiciones detalladas en la Tabla 1.

Tabla 1 – Resumen de la conformación de las probetas.

Nombre de ensayo	AC1C				A2AC2				A2CP1				A3A1							
	Cem.	Roca 1	Cem.	Roca 2	Cem.	Cem.	Roca 1	Cem.	Roca 2	Cem.	Cem.	Roca 1	Cem.	Roca 2	Cem.	Cem.	Roca 1	Cem.	Roca 2	Cem.
Arenisca							X					X					X		X	
Caliza		X		X					X											
No utilizado														X						

2.2 Equipo

Para la adquisición de los datos de EA se utilizó una placa adquisidora marca PAC modelo DISP-4 de cuatro canales y un sensor de la misma marca, de banda ancha, modelo WD con un preamplificador modelo 2/4/6 con 20 dB de ganancia. El equipo fue operado con el software PAC AEWIN Versión E4.6.

Para realizar la penetración de las probetas se utilizó una herramienta rotante de 62 mm montada sobre un carro de traslación vertical, accionado por un cilindro hidráulico, el cual es manejado por un sistema que permite regular el avance de la herramienta rotante (Fig. 5).

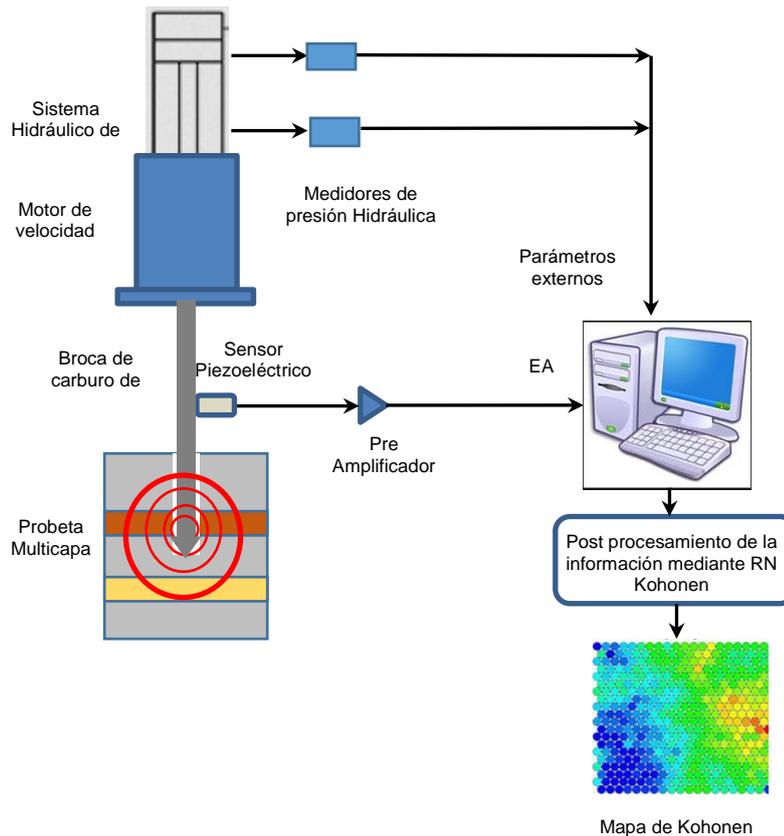


Fig. 5. Diagrama en bloques del experimento.

2.3 Parámetros de emisión acústica utilizados

En la adquisición se tomaron 20 parámetros de emisión acústica: Tiempo de subida (RISE), Cuentas (COUNTS), Energía (ENER), Duración (DUR), Amplitud (AMP), Frecuencia Media (AFRQ), RMS, Nivel Promedio de la Señal (ASL), PCNTS, Frecuencia de Reverberación (RFRQ), frecuencia inicial (IFRQ), Signal Strenght (SIG STRENGHT), Energía Absoluta (ABS ENE), Primer Cuartil de frecuencias (FREQ PP1), Segundo Cuartil de frecuencias (FREQ PP2), Tercer Cuartil de frecuencias (FREQ PP3), Cuarto Cuartil de frecuencias (FREQ PP4), Centroide de frecuencias (CFRQ), Frecuencia Pico (PFRQ).

Se decidió utilizar RMS, ABS ENERGY, COUNTS, RISE y AMP como parámetros de entrada para la red neuronal:

La selección de los parámetros de EA se basa en la correlación de Pearson ver Ec. (4), que es un valor estadístico que nos indica la dependencia lineal entre dos variables, similar a la covarianza, pero con escalas de valores normalizados entre 0 y 1.

$$\rho_{a,b} = \frac{\sigma_{ab}}{\sigma_a \cdot \sigma_b} \quad (4)$$

Dónde: σ_{ab} es la covarianza de a y b.
 σ_a es la desviación estándar de a.
 σ_b es la desviación estándar de b.

A modo de ejemplo, en la Tabla 2 se ponen los resultados obtenidos de la correlación de Pearson para el ensayo A2C1.

Tabla 2 – Coeficientes de correlación de Pearson.

A2C1	ABSENERGY	AFRQ	AMP	ASL	CFRQ	COUN	CYCLES	DURATION	ENER	FREQPP1	FREQPP2	FREQPP3	FREQPP4	IFRQ	PARA1	PARA2	PCNTS	PFRQ	RFRQ	RISE	RMS	SIGSTRENGHT
ABSENERGY	1.00	-0.03	0.24	0.13	-0.01	0.69	NaN	0.36	0.80	-0.01	-0.01	0.04	0.05	-0.05	0.01	-0.01	0.29	-0.01	0.05	0.09	0.32	0.88
AFRQ	-0.03	1.00	-0.26	-0.15	0.10	-0.11	NaN	-0.20	-0.11	0.04	0.16	0.03	0.01	0.67	0.05	0.06	-0.16	0.06	-0.19	-0.22	-0.10	-0.10
AMP	0.24	-0.26	1.00	0.63	0.06	0.37	NaN	0.22	0.43	0.18	-0.21	0.03	0.09	-0.38	0.04	-0.14	0.43	0.14	0.26	0.19	0.51	0.38
ASL	0.13	-0.15	0.63	1.00	-0.15	0.21	NaN	0.14	0.27	-0.06	-0.37	-0.09	-0.03	-0.22	-0.09	0.01	0.25	-0.08	0.16	0.13	0.80	0.24
CFRQ	-0.01	0.10	0.06	-0.15	1.00	-0.06	NaN	-0.13	-0.04	0.92	0.56	0.22	0.13	0.10	0.12	0.01	-0.06	0.89	-0.02	-0.11	-0.12	-0.04
COUN	0.69	-0.11	0.37	0.21	-0.06	1.00	NaN	0.74	0.90	-0.06	-0.04	0.05	0.05	-0.16	-0.03	0.00	0.54	-0.05	0.10	0.28	0.33	0.91
CYCLES	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN
DURATION	0.36	-0.20	0.22	0.14	-0.13	0.74	NaN	1.00	0.67	-0.14	-0.08	0.01	0.02	-0.21	-0.07	0.03	0.40	-0.13	0.00	0.42	0.19	0.63
ENER	0.80	-0.11	0.43	0.27	-0.04	0.90	NaN	0.67	1.00	-0.03	-0.06	0.02	0.04	-0.15	-0.02	-0.02	0.51	-0.03	0.08	0.27	0.41	0.97
FREQPP1	-0.01	0.04	0.18	-0.06	0.92	-0.06	NaN	-0.14	-0.03	1.00	0.26	0.06	0.03	0.01	0.11	-0.09	-0.05	0.85	0.02	-0.10	-0.07	-0.03
FREQPP2	-0.01	0.16	-0.21	-0.37	0.56	-0.04	NaN	-0.08	-0.06	0.26	1.00	0.27	0.14	0.20	0.12	0.14	-0.07	0.52	-0.07	-0.09	-0.23	-0.05
FREQPP3	0.04	0.03	0.03	-0.09	0.22	0.05	NaN	0.01	0.02	0.06	0.27	1.00	0.68	0.04	0.00	-0.01	0.04	0.13	0.00	0.00	-0.03	0.02
FREQPP4	0.05	0.01	0.09	-0.03	0.13	0.05	NaN	0.02	0.04	0.03	0.14	0.68	1.00	0.00	0.00	-0.02	0.05	0.08	0.01	0.00	0.00	0.03
IFRQ	-0.05	0.67	-0.38	-0.22	0.10	-0.16	NaN	-0.21	-0.15	0.01	0.20	0.04	0.00	1.00	0.05	0.08	-0.26	0.05	-0.30	-0.35	-0.16	-0.13
PARA1	0.01	0.05	0.04	-0.09	0.12	-0.03	NaN	-0.07	-0.02	0.11	0.12	0.00	0.00	0.05	1.00	-0.03	-0.04	0.12	-0.01	-0.07	-0.06	-0.01
PARA2	-0.01	0.06	-0.14	0.01	0.01	0.00	NaN	0.03	-0.02	-0.09	0.14	-0.01	-0.02	0.08	-0.03	1.00	-0.01	-0.01	-0.03	0.01	0.01	-0.02
PCNTS	0.29	-0.16	0.43	0.25	-0.06	0.54	NaN	0.40	0.51	-0.05	-0.07	0.04	0.05	-0.26	-0.04	-0.01	1.00	-0.04	0.16	0.63	0.30	0.45
PFRQ	-0.01	0.06	0.14	-0.08	0.89	-0.05	NaN	-0.13	-0.03	0.85	0.52	0.13	0.08	0.05	0.12	-0.01	-0.04	1.00	0.02	-0.10	-0.08	-0.03
RFRQ	0.05	-0.19	0.26	0.16	-0.02	0.10	NaN	0.00	0.08	0.02	-0.07	0.00	0.01	-0.30	-0.01	-0.03	0.16	0.02	1.00	0.12	0.12	0.07
RISE	0.09	-0.22	0.19	0.13	-0.11	0.28	NaN	0.42	0.27	-0.10	-0.09	0.00	0.00	-0.35	-0.07	0.01	0.63	-0.10	0.12	1.00	0.12	0.23
RMS	0.32	-0.10	0.51	0.80	-0.12	0.33	NaN	0.19	0.41	-0.07	-0.23	-0.03	0.00	-0.16	-0.06	0.01	0.30	-0.08	0.12	0.12	1.00	0.38
SIGSTRENGHT	0.88	-0.10	0.38	0.24	-0.04	0.91	NaN	0.63	0.97	-0.03	-0.05	0.02	0.03	-0.13	-0.01	-0.02	0.45	-0.03	0.07	0.23	0.38	1.00

Una vez seleccionados los parámetros a utilizar se procedió a fraccionar los ensayos para obtener todos los tramos de señal pertenecientes a la condición de corte de cada roca particular, luego se realizó una reducción de los datos para reducir el tiempo de entrenamiento de la red.

Cada tramo se redujo a 500 datos por variable.

En la Tabla 3, se muestra el resumen para el fraccionamiento de los tramos de la señal, mostrando los tiempos de inicio y finalización de cada capa de roca, indicador (etiqueta) y cantidad de datos perteneciente a cada tramo.

Tabla 3 - Resumen de tiempos y cantidades de datos

Tabla Resumen Tiempos y Cantidad de Datos							
Ensayo	Roca	Indicador	T. Inicio	T. Final	Cant. Datos Original	Cant. Datos Reducidos	Total Reducidos
A1C1	Caliza	C	161.31	273.61	4807	480	3779
	Caliza	C	508.81	623.21	2554	510	
A2AC2	Arenisca	A	338.5	734	18681	518	
	Caliza	C	787.78	977.1	1548	516	
A2CP1	Caliza	C	378.01	430.372	675	675	
	No utilizo						
A3A1	Arenisca	A	280.55	437.44	5798	579	
	Arenisca	A	629.034	844.1	24075	501	

En las Fig. 6, 7, 8 y 9 se puede observar la fragmentación de los distintos ensayos utilizando el parámetro RMS donde se aprecia la diferencia entre cada capa de roca y de cemento.

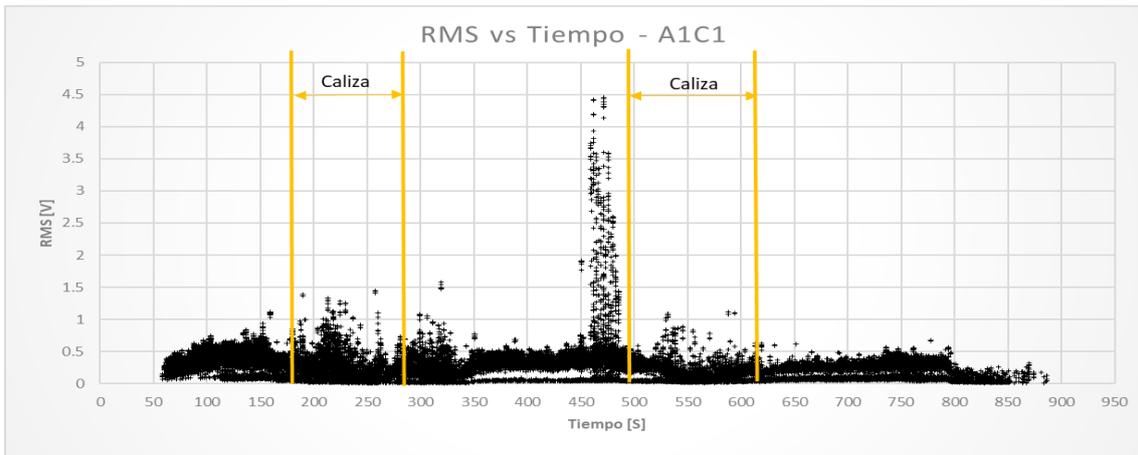


Fig. 6. RMS vs. Tiempo para ensayo A1C1.

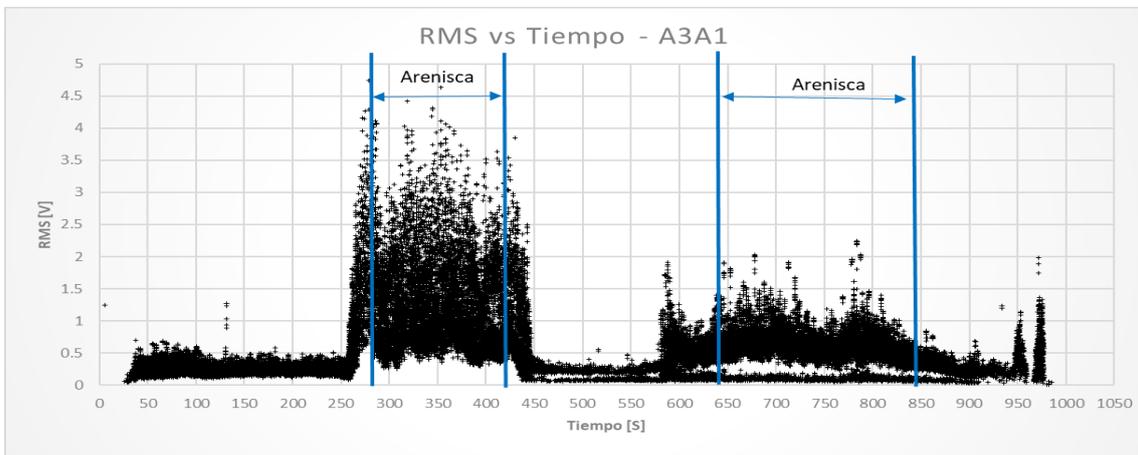


Fig. 7. RMS vs. Tiempo para ensayo A3C1.

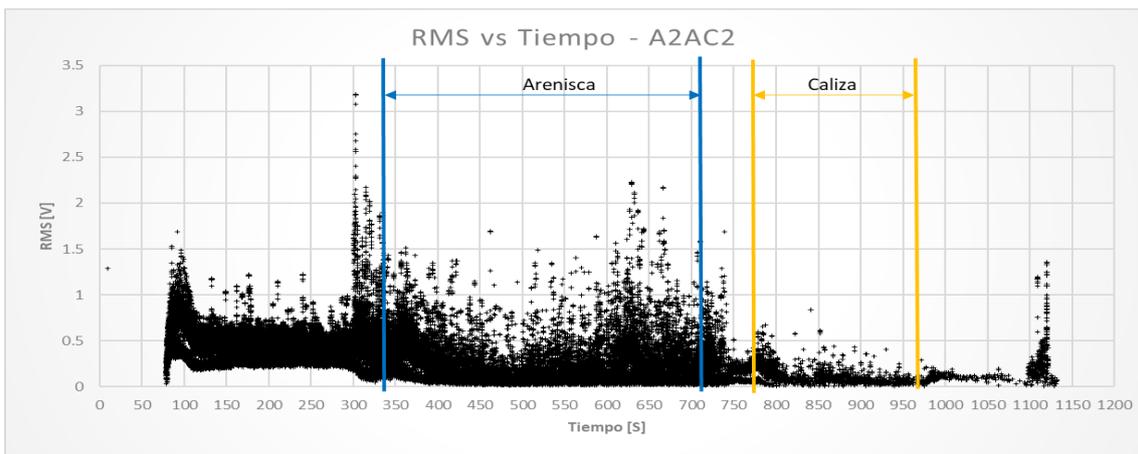


Fig. 8. RMS vs. Tiempo para ensayo A2C2.

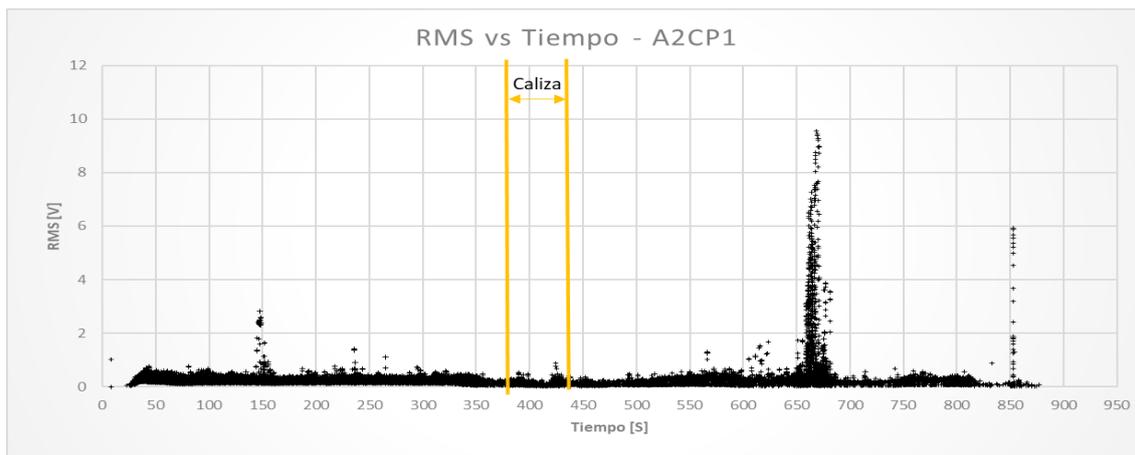


Fig. 9. RMS vs. Tiempo para ensayo A2CP1.

2.4 Arquitectura final de red neuronal Kohonen

Los parámetros determinados para la arquitectura final de la red luego de realizar varias iteraciones hasta obtener resultados aceptables se resumen en la Tabla 4.

Tabla 4. Resumen de Parámetros de red utilizados.

Tamaño de Red	25x25
Geometria	Toroidal
Top. Funcion de correccion	Gausiana
Nº de vecinos	5
Factor de Correccion	Max : 0.6 ~ Min: 0.01
Epocas de Entrenamiento	500

Proceso de entrenamiento y predicción

Los datos anteriormente seleccionados son previamente escalados entre 0 y 1, luego unidos formando matriz de 3779 x 5 (donde las filas son las mediciones y las columnas los 5 parámetros previamente seleccionados). Se realiza un escalado que tiene por objetivo que todos los parámetros queden en el mismo orden de magnitud, esto permite que el error pueda ser medido de forma efectiva y el proceso de ajustado de los pesos se realice de una forma óptima.

Los datos son etiquetados para identificar con facilidad la red resultante. Se utilizó una “A” para identificar la piedra arenisca y una “C” para identificar la piedra caliza.

Luego, los datos se ordenan aleatoriamente para que el orden de entrenamiento no sea inicialmente preferencial a una clase en particular.

Finalmente se separa el 70% de los datos para realizar el entrenamiento y un 30% para realizar la predicción, los datos introducidos en esta etapa de predicción nunca participaron en el proceso de entrenamiento y nunca se tuvieron en cuenta para el ajuste de sus pesos; sino que se ubican en la zona donde su distancia vectorial es similar a ese dato en concreto.

2. RESULTADOS

A continuación, se mostrarán los resultados obtenidos del entrenamiento (Fig. 10.a) y en la predicción (Fig. 10.b).

En el entrenamiento se observa como existe una zona donde preferencialmente se ubican los datos de arena (letras "A" de color verde) y otra gran zona donde se ubican los datos de caliza (letras "C" de color amarillo), tener en cuenta que se trata de una red de geometría toroidal con lo cual las zonas del borde son de distancias similares. También se observa la existencia de una dispersión donde algunos de los datos de "A" se encuentran dentro de la zona de "C".

En la predicción, se puede observar un patrón similar, con lo cual la clasificación se realiza de forma aceptable, se recuerda que estos datos no participaron en el ajuste de los pesos de las neuronas, con lo cual se ubican en las zonas donde los datos son los más parecidos.

El control de errores en función de la cantidad de épocas se encuentra en la Fig. 11, los resultados finales son 0.05 en error de norma y 11.45% en el error de mezclado.

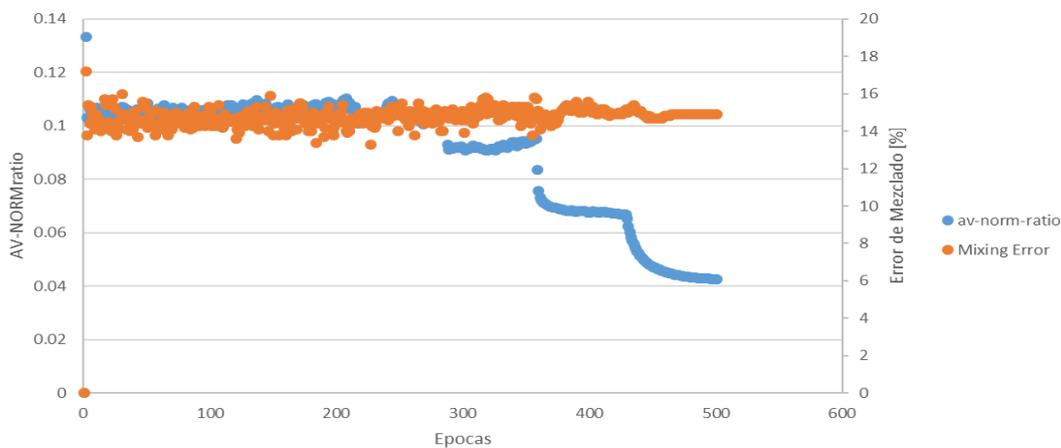
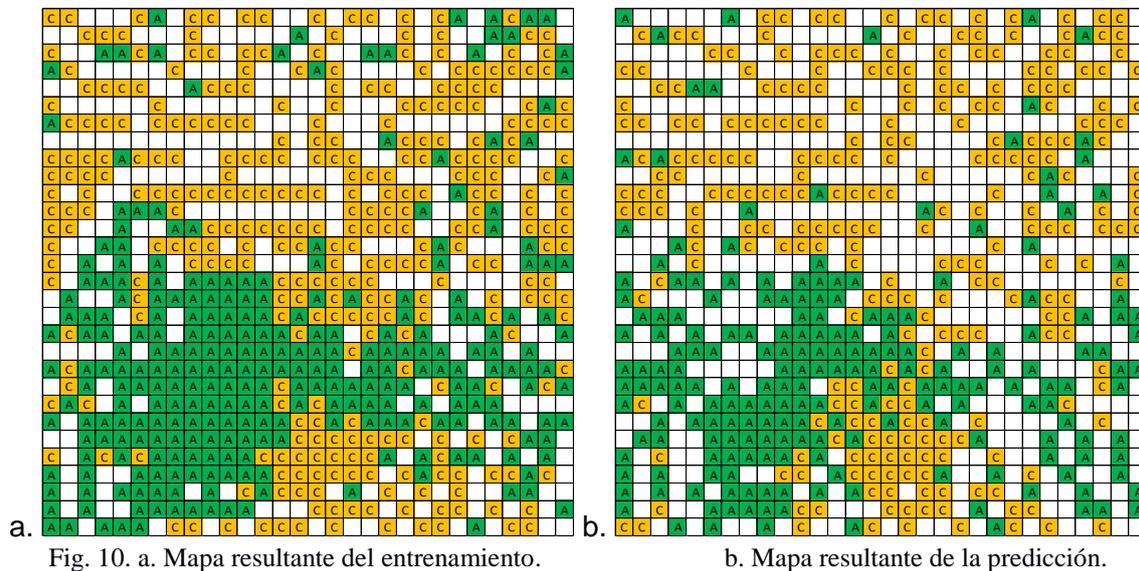


Fig. 11. Control de errores.

3. CONCLUSIONES

Se pudo observar la capacidad de las redes neuronales tipo Kohonen para clasificar información, a partir de una gran cantidad de datos, mediante patrones fácilmente reconocibles expresados de manera amigable para el usuario. Esto se podría mejorar utilizando redes multicapas con una arquitectura más compleja, optimizando aún más los parámetros de red y utilizando una mayor cantidad de datos. Este último punto conlleva a optimizar la programación del código fuente de la red para aprovechar los recursos de un ordenador moderno.

Cabe aclarar que los parámetros seleccionados son efectivos para este caso particular, para el error alcanzado expresado en los resultados, por lo cual si se utilizaran redes similares para otro propósito podrían no producirse resultados satisfactorios.

REFERENCIAS

- Beale M., Hagan M., Demuth H., Neural Network Toolbox User's Guide. MathWorks, 2010
- Zupan J., Gasteiger J., Neural Networks for Chemists. VHC, 1993.
- Yañez-Badillo H., Control Neuronal en Línea para Regulación y Seguimiento de Trayectorias de Posición para un Quadrotor - Revista Iberoamericana de Automática e Informática industrial 14 (2017) 141–151.
- Faheem., A Survey Of Intelligent Car Parking System- Journal of Applied Research and Technology 2013;11:714-26
- Hang Su., Pixel-Adaptive Convolutional Neural Networks - Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR), 2019:05:16
- Boldsaikhana E., The use of neural network and discrete Fourier transform for real-time evaluation of friction stir welding - Applied Soft Computing 11 (2011) 4839–4846.
- Fratini L., Using a neural network for predicting the average grain size in friction stir welding processes - Computers and Structures 87 (2009) 1166–1174.
- Kohonen T., Self-Organizing Maps. Springer 2001.
- Kwak J., Neural network approach for diagnosis of grinding operation by acoustic emission and power signals - Journal of Materials Processing Technology 147 (2004) 65–71.
- Jiménez Macías E., Emisión Acústica y Redes Neuronales para Modelado y Caracterización del Proceso de Soldadura por Fricción Agitación - Revista Iberoamericana de Automática e Informática industrial 10 (2013) 434–440.
- Shevchik S.A., Acoustic emission for in situ quality monitoring in additive manufacturing using spectral convolutional neural networks - Additive Manufacturing Volume 21, May 2018, Pages 598-604.
- Sick B., On-line and indirect toolwear monitoring in turning with artificial neural networks: a review of more than a decade of research - Mechanical Systems and Signal Processing (2002) 16(4), 487–546.
- Rajesh Kumar B., Regression analysis and ANN models to predict rock properties from sound levels produced during drilling - International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences 58 (2013) 61–72
- Suresh Kumar C., Failure strength prediction of glass/epoxy composite laminates from acoustic emission parameters using artificial neural network - Applied Acoustics 115 (2017) 32–41.
- Perez S., A preliminary study on the role of acoustic emission on inferring Cerchar abrasivity index of rocks using artificial neural network – Wear 344-345 (2015) 1–8.

ESTUDIO DE PROPIEDADES MECÁNICAS EN TUBOS DE CFRP

Bonelli Toro A.^a, Podetti G., Arcone D.^b, Daverio N.^b, Hazarabedian A.^b y Gómez M. P.^a

^aGrupo de Ondas Elásticas, GDTyPE, Centro Atómico Constituyentes, CNEA, San Martín, Buenos Aires, ARGENTINA

^bDivisión de Materiales Avanzados, Departamento de Materiales, Centro Atómico Constituyentes, CNEA, San Martín, Buenos Aires, ARGENTINA

e-mail: abonellitoro@gmail.com

RESUMEN

Para estudiar la variación de resistencia mecánica de un tubo fabricado por filament winding en función del ángulo de bobinado se fabricaron 2 tubos de la forma $[0 \pm \theta 0]_T$ con $\theta_1=15^\circ$ y $\theta_2=25^\circ$. Se analizó la resistencia mecánica circunferencial aparente de cada tubo mediante ensayos de disco partido según la norma ASTM D2290, colocando además sensores de Emisión Acústica (EA) en el disco superior para detectar la propagación de ondas elásticas producidas por la solicitación de los anillos de CFRP. Se simuló la resistencia mecánica circunferencial utilizando Teoría de Láminas, modelando la capa helicoidal como una superposición de dos capas de ángulos $\pm\theta$. Se utilizaron criterios de falla de la primera lámina, en particular el criterio de máxima tensión y el criterio de Tsai-Wu modificado. Los resultados experimentales arrojaron valores de resistencia mayores a la simulación, lo cual es coherente con el hecho de que se use un criterio de falla de la primera lámina; la falla catastrófica del componente ocurre a una carga superior a la necesaria para que falle la primera lámina. Por otro lado, las mediciones de EA permitieron determinar el valor de la carga en la que ocurre la primera falla, así como predecir el instante previo en el que se llega a la tensión de rotura del anillo. Los resultados obtenidos fueron separados en 3 etapas: baja, intermedia y alta actividad a partir de la variable de EA Energía Acumulada. Este estudio constituye la primera etapa de una serie de investigaciones que buscan identificar, localizar y caracterizar las fallas en este tipo de componentes.

Palabras Clave: materiales compuestos, emisión acústica, filament winding.

1. INTRODUCCIÓN

1.1. Materiales Compuestos

Los materiales compuestos se constituyen de dos o más materiales de características disímiles, conformando un nuevo material con características superiores. En su configuración más usual, constan de dos partes, refuerzo y matriz (Figura 1). El refuerzo determina la resistencia y rigidez del material mientras que la matriz es el elemento que transfiere la carga entre las fibras y las protege de condiciones ambientales adversas (temperatura y humedad) [Nijssen, 2015]. Su fabricación es muy versátil, permitiendo variar los tipos de matriz y fibra y la disposición de esta última, obteniendo propiedades mecánicas muy variadas. Se ha impulsado su desarrollo en las últimas décadas en busca de una mejora de las propiedades específicas (el cociente entre la propiedad y su peso). Los materiales compuestos se utilizan mayoritariamente en industrias de altas exigencias como la automotriz, aeronáutica, aeroespacial y nuclear.

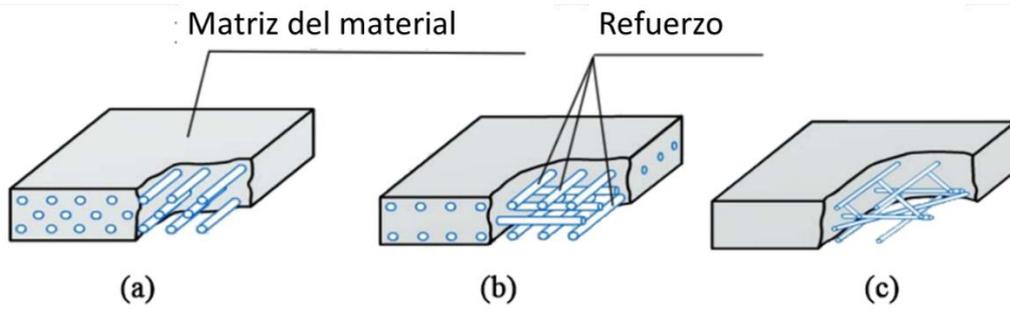


Figura 1: Detalle de material compuesto con matriz y refuerzo (a) refuerzo unidireccional, (b) refuerzo entrecruzado, (c) refuerzo aleatorio.

1.1.1. Filament Winding

La técnica de filament winding (FW) es una de las técnicas más comunes utilizada en la manufactura de tubos. El método de devanado helicoidal genera que las capas de las fibras sean entretrejidas, permitiendo que la fibra se enrolle en un ángulo de entre 20° a 80° con respecto al eje longitudinal del mandril [Rousseau, 1999].

El objetivo es cubrir por completo el mandril con un espesor constante del material compuesto. La fibra se deposita en un extremo del mandril y se enrolla en un ángulo constante hacia el otro extremo (Fig. 2a). A esta etapa se la denomina primer **pasaje**. Luego el carro se detiene y comienza a moverse en sentido contrario. Dos pasajes del carro constituyen un **circuito** (Figura 2b). A diferencia de un laminado convencional, la formación de una capa del tubo tendrá fibras entretrejidas con orientación θ y $-\theta$ como se puede apreciar en la Figura 2d [Barbero, 2018][Hernández-Moreno, 2008].

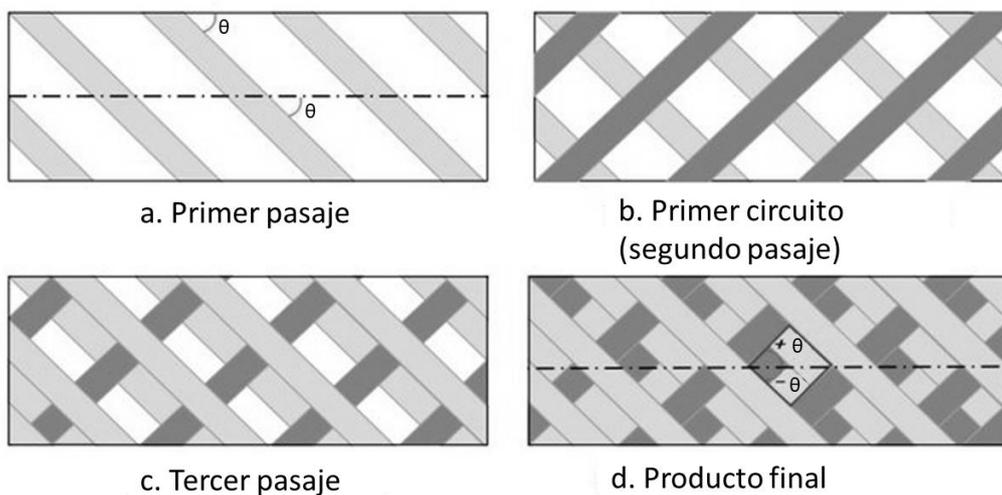


Figura 2: Proceso de FW.

Si se desea conocer el número de circuitos necesarios para cubrir por completo el mandril, se puede determinar mediante:

$$N = \frac{\pi D \cos(\theta)}{B} \quad (1)$$

donde D es el diámetro del mandril y B es el ancho de la fibra utilizada (se considera constante).

El entrecruzado de las fibras forma patrones con forma de diamante en la superficie de la pieza, como se observa en la Figura 2d. Es de notar que entre distintas zonas hay mayor y menor grado de entrecruzamiento de las fibras, lo cual constituye uno de los impedimentos para utilizar teorías simplificadas como la Teoría Clásica de Láminas para este tipo de piezas. Esta teoría es una de las más desarrolladas para el análisis de materiales compuestos y supone la superposición de láminas orientadas en una única dirección.

1.2. Emisión Acústica

El método de Ensayos no Destructivos de Emisión Acústica (EA) permite detectar distintos tipos de sollicitaciones (mecánicas, térmicas, químicas, etc.) a partir de la propagación de ondas elásticas, utilizando sensores que convierten la energía mecánica en eléctrica en el rango de 20 kHz y 1MHz [Gómez, 2015]. En la Figura 3 se exhibe un esquema de un sistema de medición de EA, constituido por un sensor de EA, usualmente un sensor piezoeléctrico; debido a la baja tensión eléctrica en la salida del sensor, se debe utilizar un preamplificador para preservar la relación señal a ruido; luego, se aplica un filtro *anti-aliasing* o pasabanda; por último, se utiliza un convertor analógico digital, que usualmente tiene otra etapa de amplificación para maximizar la resolución de la señal adquirida. Los datos obtenidos pueden ser almacenados y procesados en la computadora.

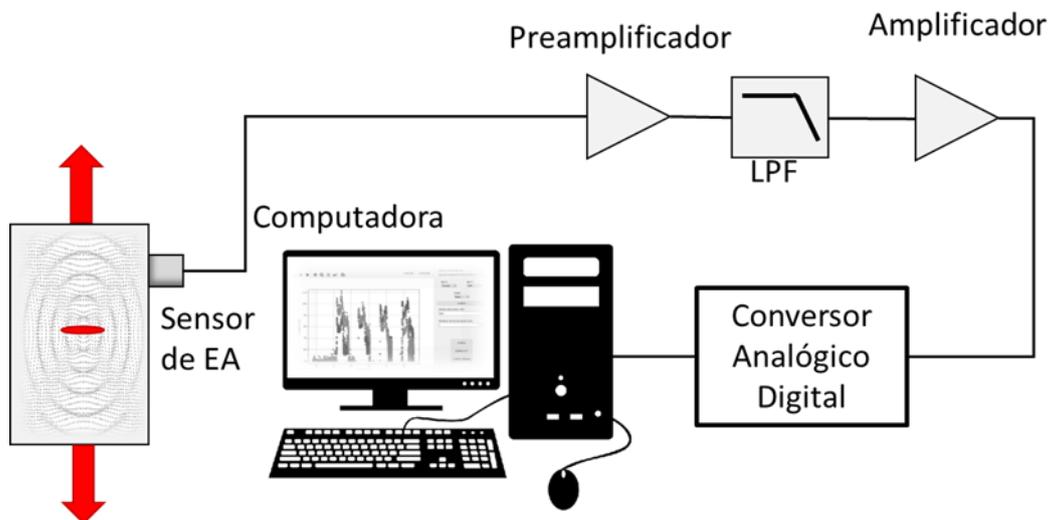


Figura 3: Esquema de un equipo de medición de EA.

Usualmente los equipos permiten distintos tipos de adquisición de las señales de EA. Se dice que se obtienen **parámetros de EA** cuando se fija un determinado umbral y se obtienen descriptores de las formas de onda que lo superan. Estas formas de onda que superan el umbral son denominadas **hits de EA**. Los descriptores más comunes son la amplitud máxima, las cuentas (cantidad de veces que cruza el umbral la señal), la duración, el tiempo de subida, la frecuencia promedio y de reverberación y la energía. Otro método de adquisición radica en almacenar los hits de EA.

El *Streaming* consiste en el registro completo de la señal durante todo el ensayo, sin considerar ningún umbral. Este método suele resultar poco viable ya que se requiere una alta capacidad de almacenamiento y procesamiento.

El interés del desarrollo del método de EA para la utilización en materiales compuestos radica en la posibilidad de la localización de la falla del componente [Plöckl, 2012], la determinación de los modos distintos modos de falla (delaminado, despegado, rotura de matriz, rotura de fibra, entre otros) y la posibilidad a futuro del monitoreo en línea de componentes.

2. DESARROLLO EXPERIMENTAL

El trabajo consistió en la elaboración de probetas de CFRP con forma de anillo para estudiar la resistencia mecánica en la dirección circunferencial mediante ensayos de disco partido realizando en paralelo mediciones de EA.

2.1. Fabricación de probetas

Se realizaron tubos de polímero reforzado de fibras de carbono (CFRP, por sus siglas en inglés) mediante el método de FW variando los parámetros de bobinado, en particular el ángulo de bobinado y la repetitividad. Los componentes seleccionados para la fabricación fueron fibra de carbono Torayca® T700-12k y resina epoxi de tipo DGEBA + DGEBD con endurecedor de diamina cicloalifática mediante una bobinadora realizada íntegramente en la División de Materiales Avanzados del Centro Atómico Constituyentes. Se bobinaron un total de 2 tubos, buscando analizar dos ángulos de bobinado diferentes. La primera y última capa del tubo está constituida por un laminado circunferencial. Entre estas capas se utiliza una capa helicoidal de ángulo $\pm\theta$. Los tubos estudiados tienen un ángulo de $\theta=15^\circ$ y $\theta=25^\circ$ con una repetitividad de 3 y 10, respectivamente.

Se dividió el tubo con una sierra manual en tres partes mediante una sierra manual. Luego se cortaron con un torno y herramientas de soporte probetas de ancho de una pulgada según la norma D2290.

2.2. Ensayo de tracción y aplicación de EA

El ensayo de tracción de disco partido consiste en colocar, dentro de una probeta con geometría de anillo, dos semidiscos sostenidos con mordazas autocentrantes en una máquina de ensayos universal. Posteriormente, se separan los semidiscos progresivamente hasta que falla la probeta. La resistencia mecánica aparente se calcula:

$$\sigma = \frac{P}{2eD} \quad (2)$$

donde P simboliza la carga de la probeta durante el ensayo, e el promedio del espesor y D el promedio del ancho de la probeta. Los promedios fueron medidos en tres puntos diferentes de la probeta. Los ensayos se realizaron en una máquina de ensayos universal servohidráulica Instron 8802.

Se colocaron sensores de EA en el disco superior evitando el ruido mecánico producido en la base de la máquina de tracción (Ver Figura 4). Se utilizaron dos sensores de banda ancha y preamplificadores con una ganancia de 20 dB en conjunto con una placa PCI-2

de Physical Acoustics Corporation, con una resolución de 18 bits y 5 Ms/s. Para contrastar los datos del ensayo de tracción con los de EA, se conectaron dos canales de parámetros externos correspondiente a la carga y al desplazamiento. Se utilizó un umbral de amplitud en 48 dB que permitió minimizar el ruido proveniente de fuentes externas.

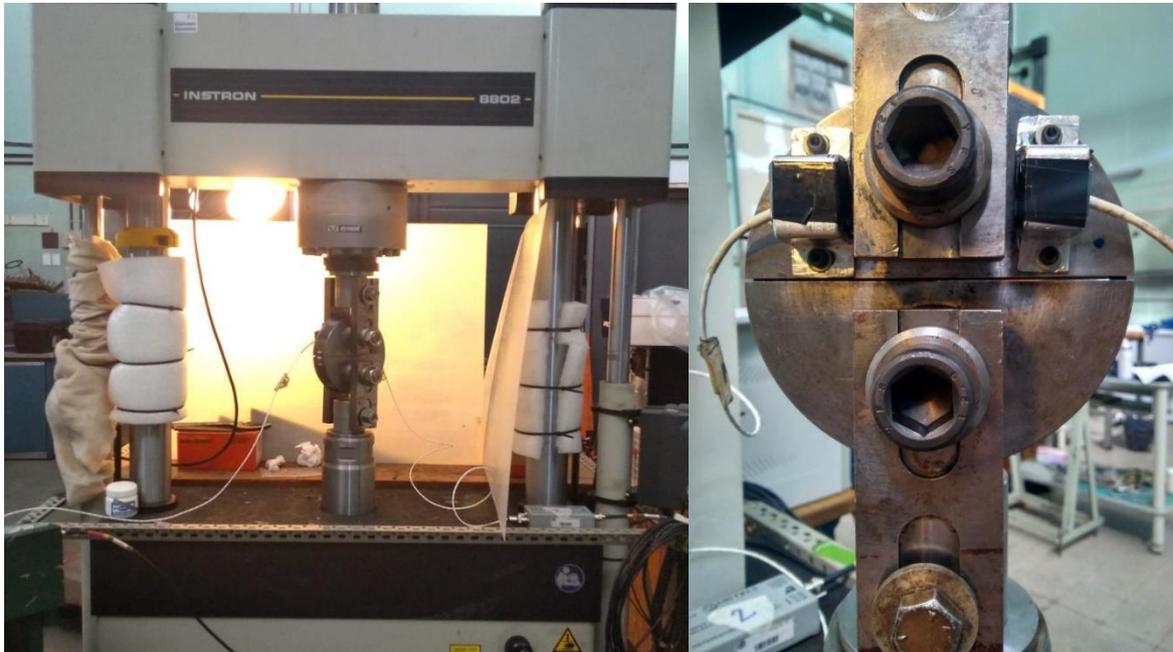


Figura 4: Ensayo de disco partido instrumentado con sensores de EA

Posteriormente se realizó un análisis de los parámetros de EA obtenidos y se eliminaron los hits de EA con energía nula. Utilizando este criterio se logró disminuir la cantidad de muestras a analizar de 20.000 a 3.000 aproximadamente, por cada uno de los ensayos. Para poder visualizar los resultados obtenidos se utilizó una interfaz de EA realizada íntegramente en Python, en conjunto con una serie de algoritmos que permitieron el análisis y procesamiento de los parámetros de EA y los valores obtenidos por el ensayo de tracción.

Una vez obtenidos los valores de rotura, se contrastaron los valores del ensayo con una simulación basada en la Teoría de Láminas utilizando como criterio de falla la rotura de primera capa según el criterio de máxima tensión y de Tsai-Wu modificado.

3. RESULTADOS

En la Figura 5 se muestra una comparación entre los resultados de la tensión de rotura de primera capa de la simulación, obtenidos mediante el criterio de máxima tensión y el criterio de Tsai-Wu modificado, y los resultados de rotura experimentales. Los valores obtenidos a partir de la simulación arrojan valores menores al experimento. Esto se debe a que ambos métodos utilizan un criterio de falla de primera lámina, mientras que en el experimento la falla catastrófica del componente sucede a una carga superior a la necesaria para que falle la primera lámina. Sin embargo, en las curvas de tensión-

deformación no se observan indicios claros de la rotura de primera lámina. Por este motivo los resultados obtenidos fueron complementados por la información provista por la EA producida durante el ensayo.

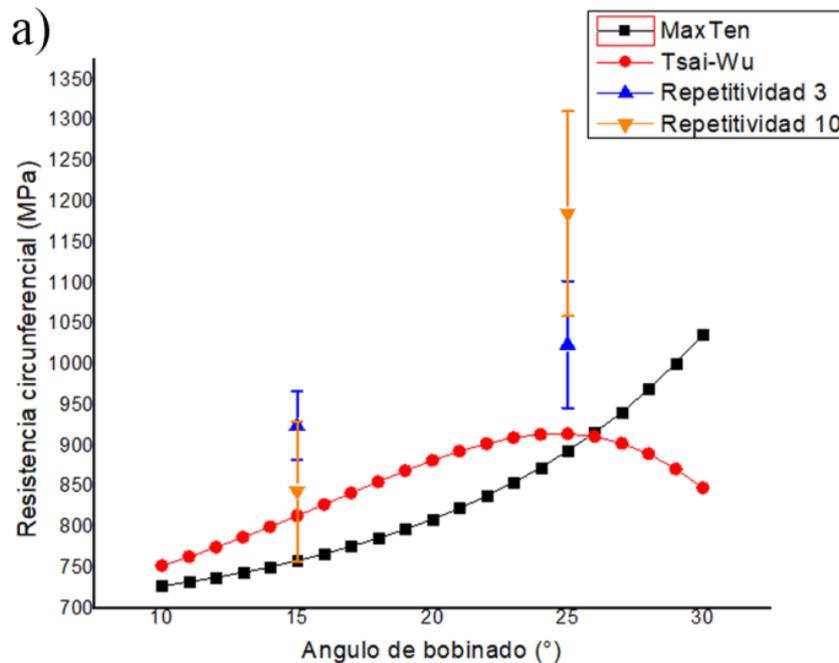


Figura 5: Comparación gráfica de los datos obtenidos con la simulación

Se analizaron los datos de EA obtenidos. Se graficó el parámetro externo de carga en simultáneo con distintos parámetros de EA en función del tiempo. Se destacó en color gris el rango de la zona de rotura de primera capa obtenido por la simulación. En el caso del $\theta=25^\circ$ estuvo entre 850 y 950 MPa y en el de $\theta=15^\circ$ entre 720 y 820 MPa.

En la Figura 6 se puede observar la energía acumulada de los hits de EA. A partir de esta variable, se pudo observar en todos los casos un cambio de pendiente en la región donde ocurre la rotura de primera capa según la simulación. Estas variaciones en la energía acumulada se asocian usualmente al inicio de la falla del componente. Es por este motivo que se podría considerar que los datos entregados por la EA constituyen un vínculo entre la simulación obtenida y las mediciones realizadas. En la Figura 6a se puede observar el cambio de pendiente para una de las probetas del tubo de $\theta=15^\circ$ y repetitividad 3 y en la Figura 6b se puede observar el mismo fenómeno para las de $\theta=25^\circ$ y repetitividad 10.

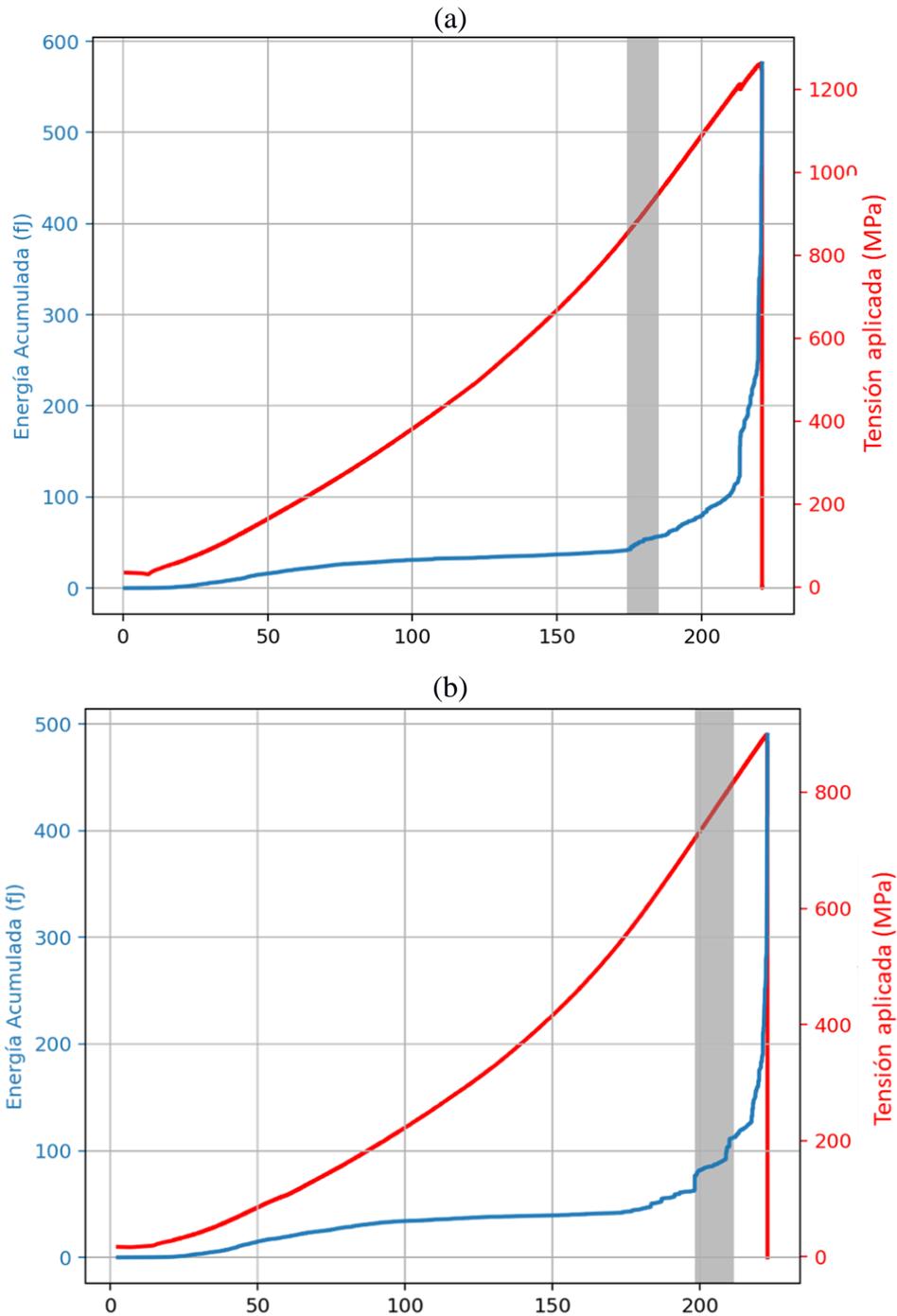


Figura 6: Parámetro de Energía y Carga en función del tiempo para (a) el anillo de $\theta=15^\circ$ y repetitividad 3 y (b) el anillo de $\theta=25^\circ$ con una repetitividad 10.

4. CONCLUSIONES

En el presente trabajo se ensayaron probetas de CFRP Construidas mediante la técnica de FW. Se realizaron ensayos de tracción de disco partido y se compararon los resultados con una simulación de rotura de primera capa realizada por dos modelos

teóricos. En simultáneo, se utilizó en método de EA para detectar el inicio de la falla del componente.

Al comparar los resultados para la tensión de rotura de primera capa obtenida en la simulación contra los valores de rotura dados por los ensayos mecánicos, se observa una diferencia relativa notoria. Esto puede deberse a que la simulación considera la rotura de la primera capa y no la rotura catastrófica del componente. Además, se utiliza un modelo clásico de láminas el cual no considera el entretejido de las capas.

Contrariamente, cuando las simulaciones se comparan con los resultados de la energía absoluta acumulada de la EA, para todos casos, se puede distinguir la concordancia entre el inicio de la falla del componente con los valores teóricos dados por la simulación, lo que muestra la ventaja y la capacidad de aplicar el método de EA.

REFERENCIAS

- Barbero, E. J. *Introduction to Composite Materials Design* (3rd ed.) 2018. CRC Press.
- Hernández-Moreno, H., Douchin, B., Collombet, F., Choqueuse, D., & Davies, P. Influence of winding pattern on the mechanical behavior of filament wound composite cylinders under external pressure. *Composites Science and Technology* 2008, 68, 1015–1024.
- Nijssen, L. *Composite Materials an introduction* (1^o) 2015. Inholland University of Applied Sciences.
- Plöckl, M., Sause, M. G. R., Scharringhausen, J., & Horn, S. Failure Analysis of NOL-Ring Specimens by Acoustic Emission. In *30th European Conference on Acoustic Emission Testing & 7th International Conference on Acoustic Emission* 2012; (pp. 9–14).
- Podetti, G. *Influencia de los patrones bobinado en la resistencia mecánica de tubos de PRFC*. Instituto de Tecnología Jorge Sabato, Universidad Nacional de General San Martín 2019.
- Ramasso, E., Placet, V., Gouriveau, R., Boubakar, L., & Zerhouni, N. Health Assessment of Composite Structures in Unconstrained Environments Using Partially Supervised Pattern Recognition Tools. *Safety, Reliability, Risk and Life-Cycle Performance of Structures / Infrastructures* 2012, 1–11.
- Ramasso, E., Placet, V., & Boubakar, M. L. Unsupervised Consensus Clustering of Acoustic Emission Time-Series for Robust Damage Sequence Estimation in Composites. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement* 2015, 64(12), 1–11.
- Rousseau, J., Perreux, D., & Verdie, N. The influence of winding patterns on the damage behaviour of. *Composites Science and Technology* 1999, 59, 1439–1449.

INTERFAZ PARA VISUALIZAR Y PROCESAR SEÑALES DE EMISIÓN ACÚSTICA

Bonelli Toro A. G.^a, Iofrida M. J.^b, y Gómez M. P.^{a,c}

^a Grupo de Ondas Elásticas, Gerencia de Desarrollo Tecnológico y Proyectos Especiales, CNEA, Argentina.

^b Gerencia de Materiales, Gerencia de Área de Energía Nuclear, CNEA, Buenos Aires, Argentina.

^c GEA, FRD, UTN, Campana, Argentina.
e-mail: abonellitoro@gmail.com

RESUMEN

La Emisión Acústica (EA) es un método de Ensayos No Destructivos que utiliza ondas elásticas para la detección de propagación de fisuras, corrosión, etc., al someter al material a algún tipo de sollicitación que active posibles fuentes de EA. Esto se realiza utilizando un sensor encargado de transformar la energía mecánica (ondas elásticas) en eléctrica. Esta señal en general se digitaliza, con el objetivo de poder almacenarla y procesarla, a tiempo real o posteriormente en caso de ser necesario. De esta forma, se puede acceder a un archivo con la medición realizada, mediante el uso de una interfaz gráfica, usualmente provista por el mismo fabricante que realizó el equipo. En este trabajo, se presenta una interfaz de usuario desarrollada en el grupo de Ondas Elásticas en el lenguaje de programación Python. Esta interfaz permite manipular los parámetros de EA adquiridos por un equipo y software de la marca Physical Acoustics Corporation (PAC), permitiendo seleccionar un hit de EA, conocer los valores de sus parámetros (tanto propios de la EA como externos, tales como la carga o el desplazamiento), visualizar su forma de onda y su contenido espectral. Este desarrollo busca superar las limitaciones de los programas comerciales, generando la posibilidad de acoplar módulos para procesamiento específico tanto de los parámetros como de las formas de onda de EA.

Palabras Clave: Interfaz Gráfica, Software, Emisión Acústica.

1. INTRODUCCIÓN

1.1. Programación Orientada a Objetos

En el paradigma de Programación Orientada a Objetos (POO) programación, el programador debe definir el tipo de datos que la estructura contiene (atributos) y también las operaciones que puede realizar (métodos) [Hillar, 2015]. Este tipo de programación se implementa debido a la necesidad reutilizar y reciclar código, evitando la repetición innecesaria del mismo. A su vez, este paradigma permite trabajar en conjunto con otros desarrolladores en programas extensos, debido a la encapsulación de cada una de sus funcionalidades.

Se definen algunos conceptos esenciales de la POO:

- Clase: un grupo de entidades similares. Es la “fábrica” que permitirá que se construyan los objetos. Define los métodos y atributos de los mismos.
- Objeto: es la instancia de la clase. Puede haber muchas instancias de una clase en el programa.

- Herencia: es la capacidad de la POO de heredar los atributos y los métodos de otra clase, permitiendo sobrescribirlos o complementarlos.
- Métodos: Son las funciones que tiene cada clase.
- Atributos: Cómo su nombre lo dice, son las características que tendrán los objetos de una determinada clase.

1.2. Arquitectura Modelo Vista Presentador

La arquitectura de software Modelo-Vista-Presentador (MVP de ahora en adelante) fue ideada para realizar software con interfaces gráficas, ya que el procesamiento interno de la aplicación se encuentra desacoplada de la interfaz de usuario. La Vista y el Modelo están separados, mientras que el Presentador transmite la información entre ellos (Figura 1). El Modelo es el componente encargado de almacenar la información y realizar el procesamiento de datos requerido por el usuario a partir de la Vista. La Vista es la interfaz de usuario, la cual se encarga de exhibir datos y enviar señales al Presentador (a partir de la interacción del usuario) para que se las transmita al Modelo y realice las tareas correspondientes. Luego el Modelo definirá las tareas que se ejecutarán en el programa, se las enviará al Presentador y serán exhibidas por la Vista [Yang, 2010].

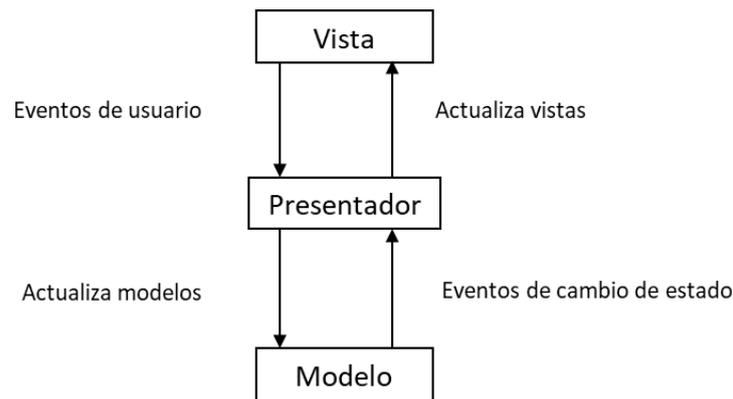


Figura 2: Diagrama en bloques que representa el funcionamiento de la arquitectura MVP

1.3. Emisión Acústica

El método de ensayos no destructivos (END) de Emisión Acústica (EA) estudia las ondas elásticas generadas en un material como consecuencia de una sollicitación [ASTM, 2010]. De esta manera, se entrega energía al material que produce la activación de las fuentes de ondas en su interior. Las ondas llegan a la superficie del material y producen desplazamientos locales que pueden ser detectados por un sensor. En general, estas ondas mecánicas están en el rango de frecuencia entre 20 kHz a 1 MHz. Las señales medidas luego son parametrizadas y analizadas por distintos métodos matemáticos estadísticos, ya que la EA es un proceso estocástico [Gómez, 2015] [Grosse, 2008].

Las ondas elásticas son detectadas y convertidas en señales eléctricas por un transductor, típicamente piezoeléctrico colocado en la superficie del componente a evaluar. La señal eléctrica es acondicionada por un preamplificador. Luego un equipo

acondiciona nuevamente la señal analógica y la digitaliza. En la Figura 2 se puede visualizar un esquema de la cadena de medición de EA típica.

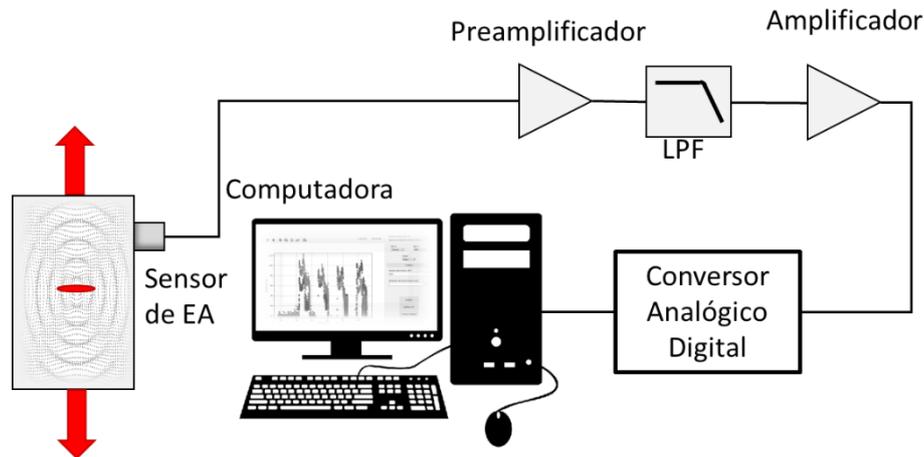


Figura 2: Cadena de medición de EA

Los equipos comerciales de EA permiten distintas maneras de adquirir la información de las señales, que podrá ser a través de un preprocesamiento como en el caso de los “Parámetros de EA” o guardando la información sin procesar como en los casos de las Formas de onda o el Streaming (o señal completa).

La mayoría de los parámetros de EA están definidos para las señales tipo estallido, y esto se hace a partir de un umbral de detección que separa la señal del ruido. Estos parámetros característicos resultan muy prácticos dado que las señales por ser de altas frecuencias requieren una alta tasa de muestreo y mucho espacio de almacenamiento). Se dice que ocurre un “hit” de EA cuando la señal de EA supera el umbral de detección. En ese momento comienza la parametrización del hit de EA cuya duración será hasta que la señal deje de cruzar el umbral. Luego, el sistema parametrizador quedará a la espera de un próximo hit. A partir de este modo de adquisición se pueden calcular una serie de parámetros como amplitud (máxima), tiempo de subida, duración, energía y otros según los fabricantes de equipos [Ohtsu, 2016].

1.3.1. Estado del arte de la EA

En la actualidad existen diversos programas que permiten la adquisición, visualización y procesamiento de las señales de EA. Usualmente los programas que permiten la adquisición pertenecen a las compañías que desarrollan los equipos.

Las compañías de mayor renombre son Physical Acoustics Corporation y Vallen Systeme. Sus programas permiten la visualización de las señales de EA en tiempo real, su adquisición y su posterior procesamiento. A su vez permiten realizar análisis en el dominio espectral. También permiten realizar la localización de la fuente de Emisión Acústica. En el Software de Vallen Systeme, el usuario puede desarrollar su script para lograr el procesamiento personalizado de las señales capturadas.

2. DESARROLLO EXPERIMENTAL

Para la adquisición de datos se utilizó un equipo convencional de EA de la marca Physical Acoustic Corporation (PAC) PCI-2 y su software asociado. Éste último registra los datos en un formato comprimido y encriptado, lo cual dificulta el acceso directo a las señales digitalizadas. Sin embargo, es posible exportar los parámetros y sus formas de onda en archivos de texto. Para poder acceder a los datos y realizar el procesamiento deseado de manera automática se realizó una interfaz gráfica en el lenguaje de programación Python.

Se desarrolló un módulo específico para el tratamiento de los parámetros de EA obtenidos utilizando la biblioteca Pandas, que permite acceder a los archivos de texto y convertirlos en objetos tipo Dataframe los cuales se asemejan a una hoja de datos. Por otro lado, se realizó un módulo que permite tratar con las formas de onda de un hit de EA como vectores de datos.

Cada uno de los módulos tuvo a su vez otro módulo que permite visualizar ambos modos de adquisición mediante la biblioteca Matplotlib. En la Figura 3 se observa el gráfico de parámetros de EA obtenido a partir del módulo desarrollado. Este gráfico permite la selección de los hits de EA de interés para poder graficar sus formas de onda (Figura 4).

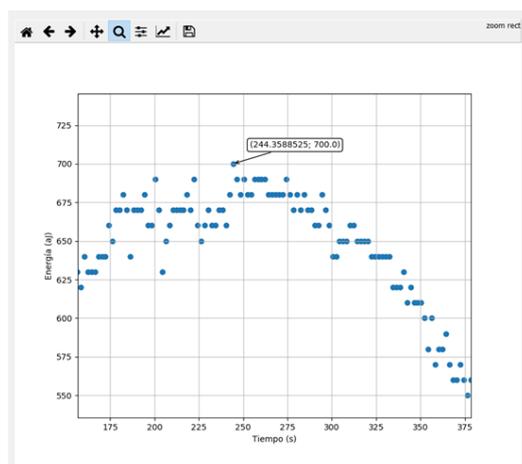


Figura 3: Gráfico de los parámetros de EA

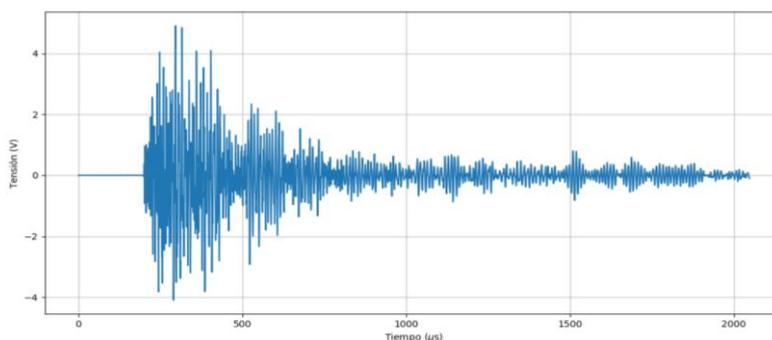


Figura 4: Gráfico de la Forma de Onda de un hit en función del tiempo

Para poder realizar un estudio más abarcativo de las formas de onda estudiadas se implementaron la transformada rápida de Fourier (FFT) y la transformada ondita (también conocida como *wavelet*).

Se realizó un objeto que obtiene la FFT, introduciendo el N y la frecuencia de muestreo a partir de la biblioteca Scipy, basada en Numpy.

La Interfaz de Usuario fue desarrollada mediante el paradigma de Programación Orientado a Objetos y una arquitectura MVP, por lo que las funcionalidades se encuentran desacopladas, permitiendo utilizar los módulos en otras aplicaciones o extender la funcionalidad del programa. La realización de la interfaz gráfica fue mediante la librería Pyside, ideada para crear interfaces. En la Figura 5 se muestra un diagrama de flujo del programa realizado.

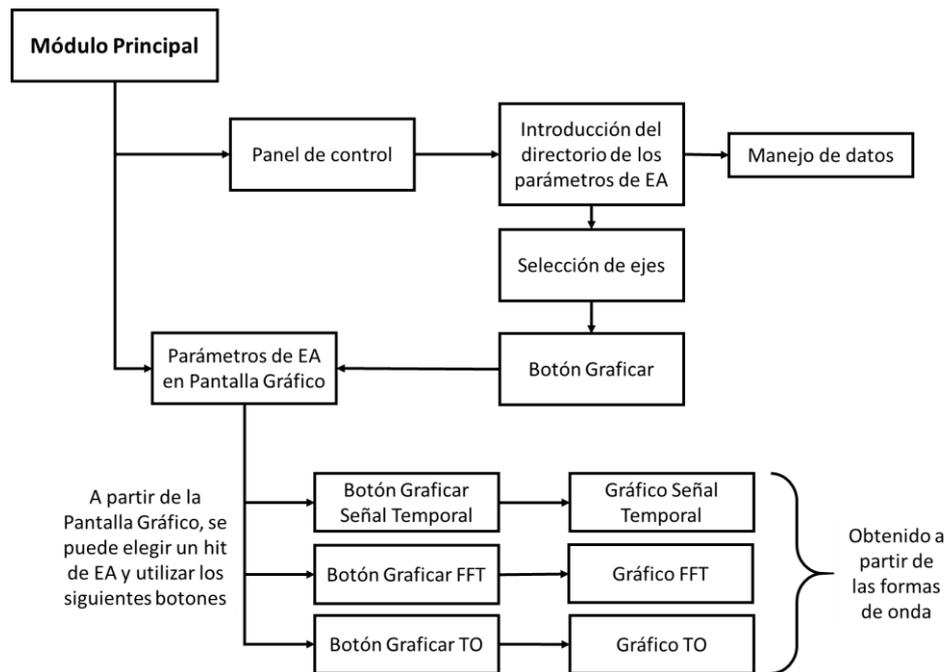


Figura 5: Diagrama en bloques que representa el funcionamiento de la arquitectura MVP.

En este programa se acoplaron los módulos desarrollados en las secciones anteriores: el módulo de Manejo de Parámetros, el módulo de Gráfico Interactivo y todos los módulos de procesamiento de datos para visualizar la forma de onda en el dominio temporal, espectral (FFT) y su Transformada Onditas (TO).

3. Resultados y análisis

Se realizaron una serie de pruebas para corroborar que el algoritmo de la FFT funcionara correctamente. En primer lugar, se utilizaron tonos puros (Fig. 6a). Luego se utilizó ruido blanco y un filtro pasabanda (centrado en diferentes frecuencias), como se puede observar en la Fig. 6b.

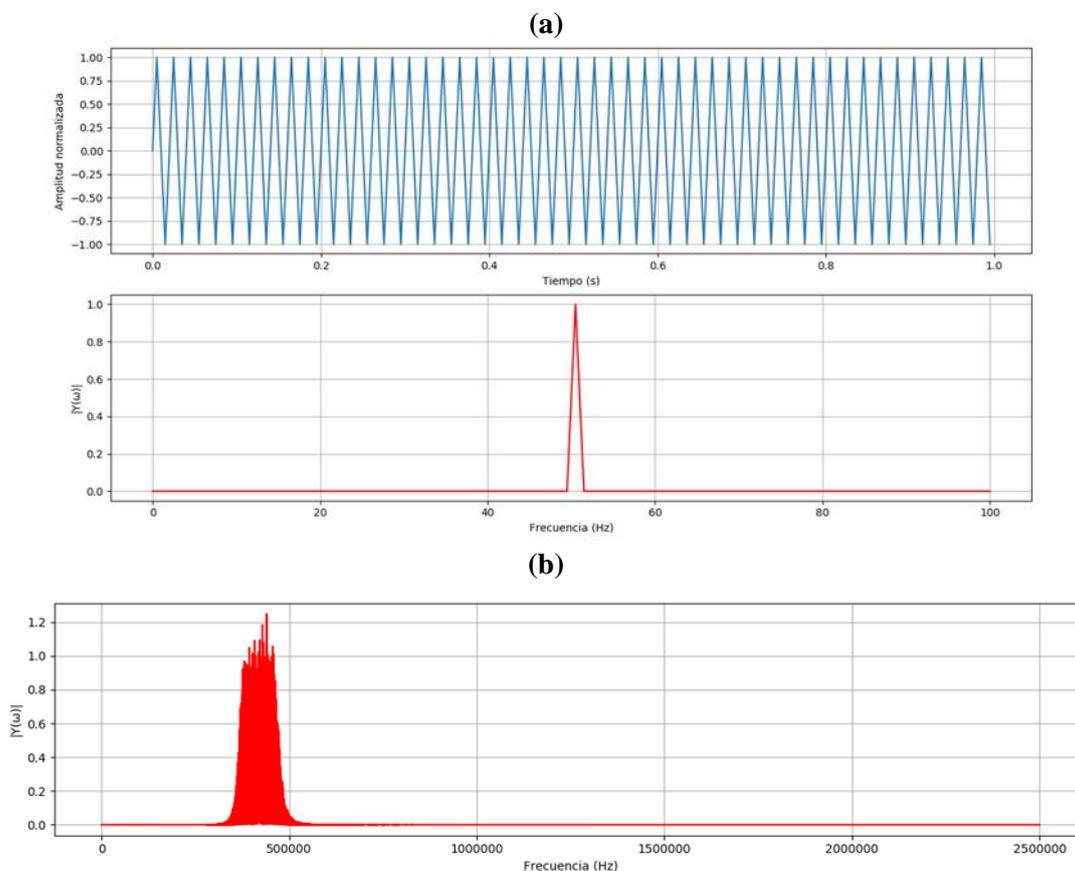


Figura 6: (a) Transformada de Fourier de un tono puro de 50 Hz; (b) Transformada de Fourier de ruido blanco filtrado en 420 kHz

Como se puede observar, la FFT funciona de manera correcta en ambos casos. Además, se corroboró que los espectros obtenidos por el software comercial y por el algoritmo son similares.

Para poder observar la intensidad del contenido espectral en función del tiempo se desarrolló la TO a partir del módulo llamado 'Wavelets'. Este módulo permite (a partir de la frecuencia de muestreo de la señal, el tiempo y el vector de datos) obtener la TO utilizando alguna ondita madre. En este caso se utilizó la ondita madre Morlet.

Para probar que las señales obtenidas por el algoritmo son fiables, se utilizó el mismo procedimiento que en la sección anterior, un tono puro y el ruido blanco filtrado. En la Fig. 7 se pueden ver las pruebas realizadas con el tono puro.

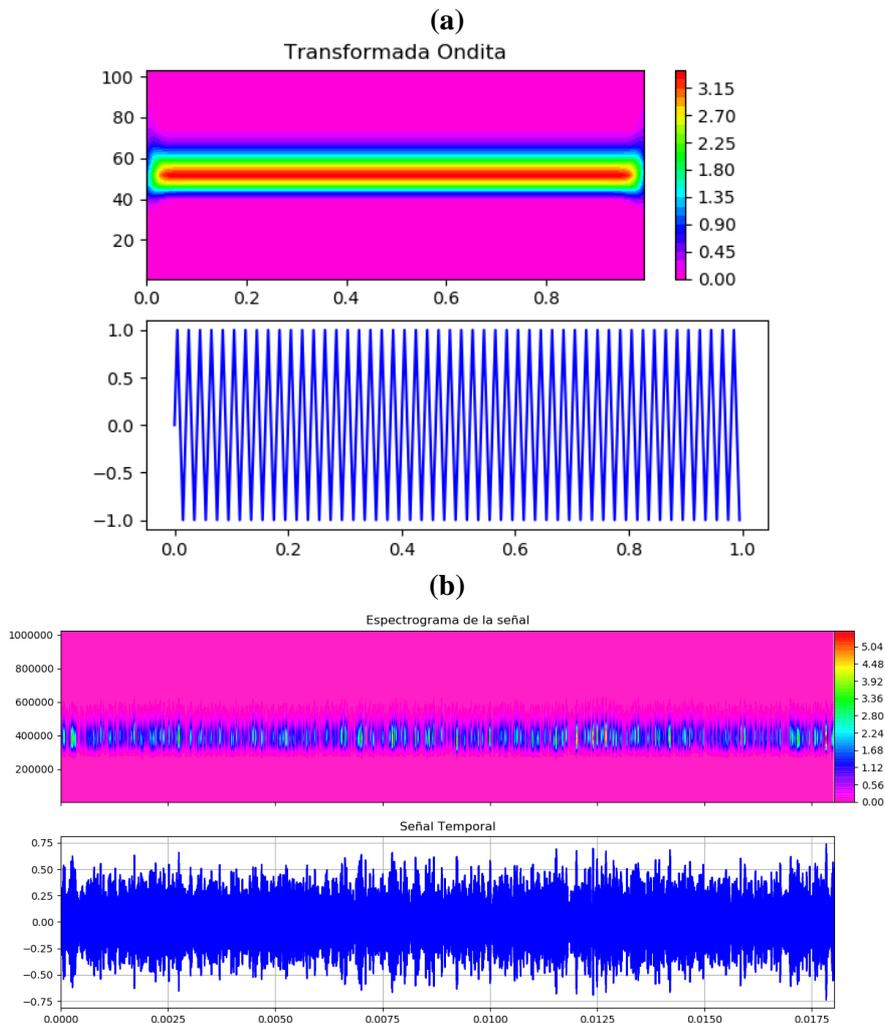


Figura 7: (a) Transformada Ondita de un tono puro de 50 Hz; (b) Transformada Ondita de ruido blanco filtrado en 420 kHz

El programa se ejecuta mediante el Módulo Principal (ver Fig. 5), el cual inicializa los objetos Panel de Control y Pantalla Gráfico de Parámetros de EA. En el Panel de Control, el programa permite obtener los parámetros de EA a partir de un archivo de texto, obtenido por el programa AEWIn – PAC ®, a partir del módulo de manejo de datos. Luego, llena las listas desplegables con los parámetros que se encuentran disponibles en el archivo, permitiendo al usuario elegir los ejes del gráfico y también el canal de EA que se desee observar (Fig.8). Al presionar el botón ‘Graficar’ se graficarán los parámetros seleccionados previamente en el objeto Gráfico Interactivo.

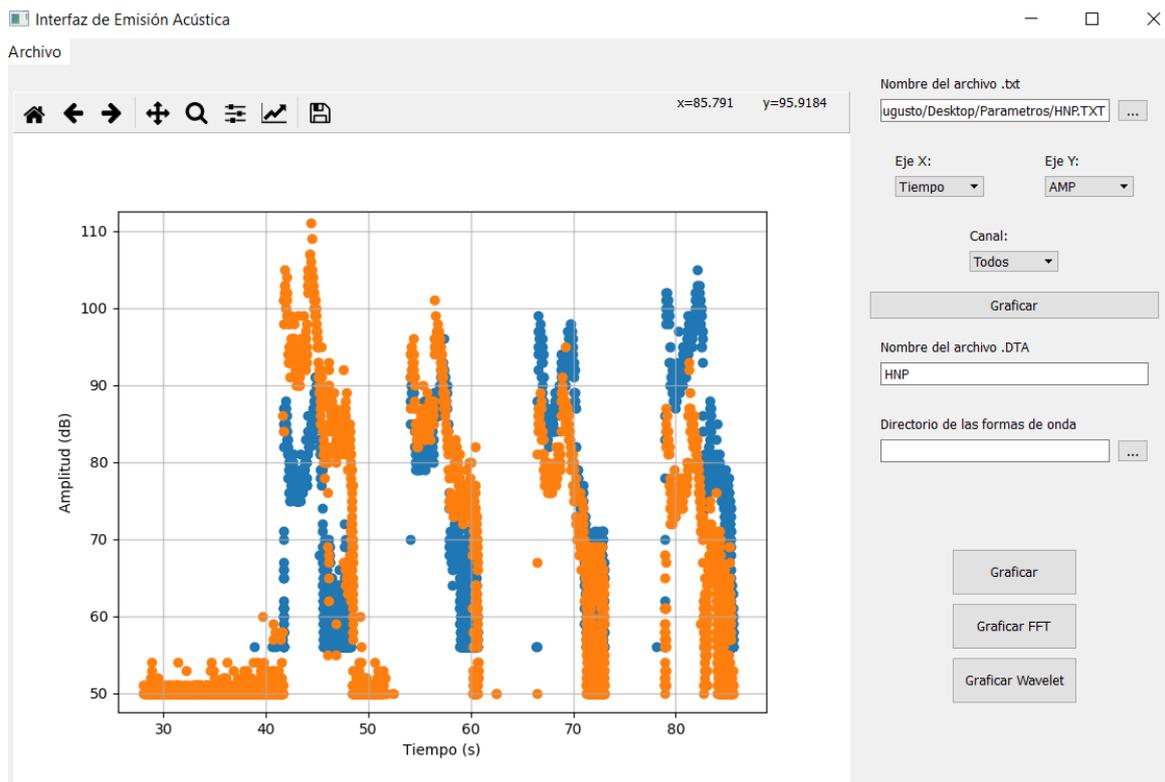


Figura 8: Esquemático de la interfaz gráfica y cada uno de sus módulos

El usuario puede seleccionar un hit dentro de los parámetros de EA para poder conocer el valor de las coordenadas X e Y. A su vez, puede colocar el prefijo del archivo de la forma de onda y seleccionando el hit a partir de los parámetros, visualizar la forma de onda, la FFT o la Transformada Ondita.

Se realizó una comparación con un software comercial. El software de EA desarrollado en este trabajo permite la selección de un hit en particular de EA, mientras que, en el comercial, no se pueden observar hits previos, ya que no permite seleccionar algún punto de los gráficos o retroceder manualmente. Esto representa una ventaja del Software desarrollado ya que permite poder ver la forma de onda de un determinado hit de EA

4. Conclusiones

En este trabajo se desarrollaron una serie de módulos en el lenguaje de programación Python, utilizando el Paradigma Orientado a Objetos, con el fin de agilizar y optimizar la visualización y procesamiento de datos en el método de END de EA. A partir de este desarrollo se puede concluir que el software realizado funciona correctamente, habiéndose testado y comparando los resultados con sofisticados softwares comerciales.

Se realizaron una serie de módulos que exceden las prestaciones de los softwares comerciales analizados, permitiendo realizar otros tipos de análisis de los hits de EA como, por ejemplo, conocer el valor exacto del parámetro que se está visualizando y obtener su forma de onda. Las pruebas y comparaciones realizadas permiten afirmar que el procesamiento de señales y sus respectivos gráficos no presentan diferencias con los programas comerciales contrastados

REFERENCIAS

- Gómez M. P., Fundamentos de la Emisión Acústica, 2015.
- Grosse, C. U. Acoustic Emission Testing. Acoustic Emission Testing, 2008.
- Hillar, G.. Learning Object-Oriented Programming. Norsk Informatikkonferanse. Packt Publishing, 2015.
- M. Ohtsu, M. Enoki, Y. Mizutani, and M. Shigeishi, Practical Acoustic Emission Testing. 2016.
- Standard Terminology for Nondestructive Examinations. Technical report, ASTM International, 2010.
- Yang Zhang, Yanjing Luo, An architecture and implement model for Model-View-Presenter Pattern, 2010.

ESTUDIO DE LA CONDICIÓN DE HERRAMIENTAS DE MECANIZADO DE MATERIALES COMPUESTOS UTILIZANDO EMISIÓN ACÚSTICA

Bonelli Toro A. G.^a, González Fuster M.^b, Fernández G.^b, Antico F.^b, Vogt P.^c y Gómez M. P.^{a,d}

^aGOE, GDTyPE, Centro Atómico Constituyentes, CNEA, San Martín, Argentina.

^bDFMC, GDTyPE, Centro Atómico Constituyentes, CNEA, San Martín, Argentina.

^cDMA, Gerencia de Materiales, Centro Atómico Constituyentes, CNEA, San Martín, Argentina.

^dGEA, FRD, UTN, Campana, ARGENTINA.

e-mail: abonellitoro@gmail.com

RESUMEN

En las últimas décadas ha habido un incremento en la utilización de materiales compuestos en industrias de altos requerimientos como la aeroespacial y aeronáutica. El monitoreo de los procesos involucrados para la elaboración de piezas es de suma importancia, ya que las tolerancias que se utilizan [en estas industrias] son muy exigentes. El agujereado es uno de los procesos de mecanizado más usuales en los materiales compuestos debido a la necesidad de vinculación entre componentes, siendo a la vez una etapa crucial, ya que el agujereado defectuoso constituye un 60% de todos los rechazos que se producen en la industria. El desgaste de las herramientas constituye uno de los mayores motivos del agujereado defectuoso ya que impide lograr una buena terminación y tamaño deseado. En el presente trabajo se estudian fresas en diferentes condiciones utilizadas para el agujereado y fresado de paneles de estructura tipo sándwich, de aplicación aeroespacial, detectando la propagación de ondas elásticas mediante el método de Emisión Acústica a partir del análisis de la parametrización de las señales generadas durante la acción de la herramienta. Se seleccionan tres fresas con diferente de desgaste con el objetivo de utilizar técnicas de reducción de variables (Componentes Principales, t-distributed Stochastic Neighbor Embedding y Mapas de Kohonen) sobre los parámetros de Emisión Acústica, buscando agrupar los distintos comportamientos. En esta primera etapa, los resultados obtenidos son promisorios, alentando la aplicación de estos sistemas para caracterizar el desgaste.

Palabras Clave: Materiales Compuestos, Mecanizado, Emisión Acústica, Técnicas de reducción de variables.

1. INTRODUCCIÓN

1.1. Estructura tipo sándwich

La estructura sándwich es un material compuesto estructural muy utilizado en la industria aeroespacial debido a su alta resistencia y rigidez específica [Davies, 2001]. Están compuestos por dos láminas delgadas que le confieren dureza y resistencia. Entre las caras se dispone un núcleo de mayor espesor, pero liviano, que usualmente no tiene una resistencia mecánica alta pero su función consiste en aportarle rigidez a la flexión cuando se combina con las caras. En la Figura 1 se puede observar un esquema de la estructura tipo sándwich. La fabricación de estos materiales es compleja y requiere de diversas etapas. Usualmente, en las caras se utiliza un multilaminado de material compuesto reforzado con fibra que de por sí requiere varias etapas y luego se debe adherir al núcleo [Bitzer, 1997].

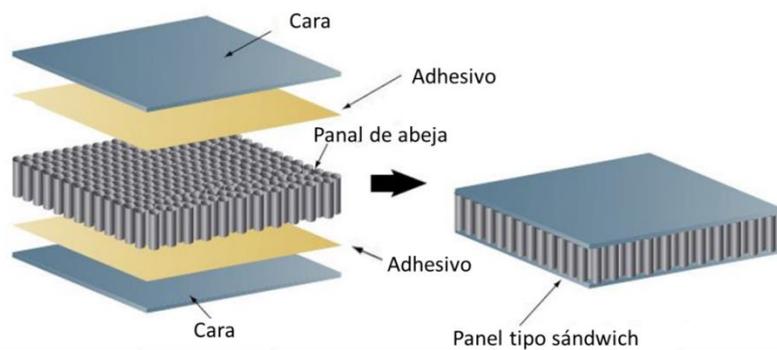


Figura 1: Estructura tipo sándwich con multilaminado de CFRP en sus caras y un núcleo de aluminio en forma de panel de abeja.

1.2. Mecanizado de estructuras sándwich

Las operaciones más comunes sobre paneles de materiales compuesto son el fresado, serruchado y agujereado, donde la pieza debe soportar rígidamente la máquina y la herramienta se desliza sobre el volumen a remover. Las variables de corte dependen exclusivamente de las fibras que se están cortando. La matriz del compuesto es completamente independiente de las variables de corte [Bauer, 2016]. Usualmente se utilizan mechas con recubrimiento de deposición física de vapor y las variables de corte dependerán de las fibras que se estén cortando, sin tener en cuenta el tipo de matriz que se utilice.

Para que la pieza resultante tenga buena terminación, la herramienta debe evitar que el filo de la herramienta ataque al laminado perpendicular al plano. Esto es inevitable pero la estrategia es utilizar herramientas de un diámetro menor al agujero que se desea realizar y luego posicionar la fresa para generar una trayectoria de contorneados concéntricos como se ve en el esquema de la Figura 2.

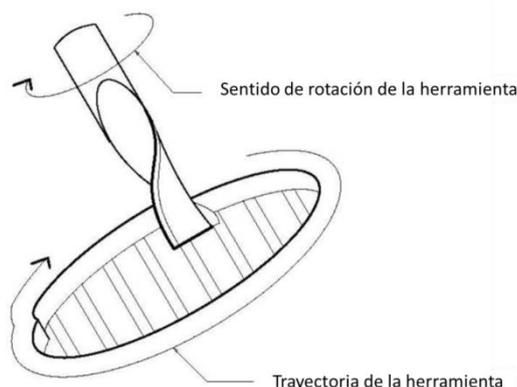


Figura 2: Esquema del mecanizado de estructuras sándwich [Bauer, 2016].

1.3. Emisión Acústica

El método de Ensayos No Destructivos (END) de Emisión Acústica (EA) permite detectar distintos tipos de sollicitaciones (mecánicas, eléctricas, químicas, etc.) a partir de la propagación de las ondas elásticas (es decir, movimiento en la superficie del

material), utilizando sensores que convierten la energía mecánica en eléctrica en el rango de 20 kHz a 1 MHz [Gómez, 2015]. Este método es denominado “pasivo” ya que no se efectúa una excitación con ondas de la misma clase para estudiar la interacción del material [Grosse, 2008], como en otros métodos de END (Ultrasonido, Rayos X, etc.), sino que las ondas provienen del mismo material.

1.4. Algoritmos de reducción de variables

Los algoritmos de reducción de variables (o de reducción de dimensionalidad) fueron desarrollados con el fin de poder visualizar los resultados de un conjunto de datos de una dimensión mayor a 3. Este tipo de algoritmos también optimiza el tiempo de procesamiento de los datos, ya que uno de los pilares fundamentales es conservar las características del conjunto de N dimensiones en el conjunto de menor dimensiones (usualmente 2 o 3).

1.4.1. Análisis por Componentes Principales

El Análisis por Componentes Principales (PCA, por sus siglas en inglés) es el más simple de los análisis multivariados basados en autovectores y autovalores. Se puede considerar que su funcionamiento revela la estructura interna de los datos a partir de exhibir su varianza. Si estamos realizando un análisis sobre una matriz de una dimensión grande, los PCA proporcionan al usuario una imagen de menor dimensión, una proyección de este conjunto de datos mirándolo desde otra perspectiva, usualmente complementario [Einasto, 2011].

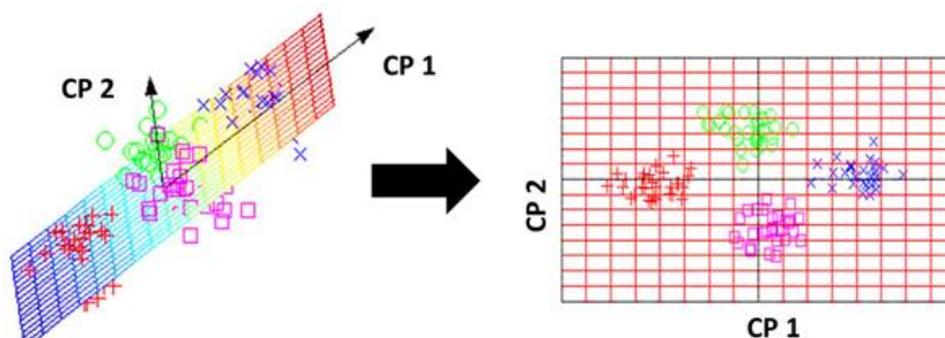


Figura 3: Comparación entre los datos originales de una matriz de datos (derecha) y el agrupamiento de distintos valores mediante el PCA.

1.4.2. t-distributed Stochastic Neighbor Embedding

Otro método de reducción de variables es el *t-distributed Stochastic Neighbor Embedding* (t-DSNE, por sus siglas). A diferencia de los PCA, el t-DSNE permite un mejor análisis de comportamientos no lineales de una matriz de datos, convirtiendo un grupo de datos de alta dimensión (es decir, mayor a 3) $X = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$ en un espacio de baja dimensión (dos o tres dimensiones) $Y = \{y_1, y_2, \dots, y_n\}$, permitiendo visualizar el conjunto de datos [Hinton, 2002]. Se denomina al conjunto Y como mapa, y a sus puntos de baja dimensión y_i puntos del mapa. El objetivo de este algoritmo es poder

mantener la estructura de los datos del espacio multidimensional y sus vecindades en el espacio de baja dimensión.

1.4.3. Mapas de Kohonen

El mapa auto-organizado (SOM) es un tipo de red neuronal que tiene una sola capa de neuronas, y su etapa de entrenamiento es no supervisada. Esto implica que solo se introduce la matriz de datos a la entrada a la red neuronal. No hay una salida ideal proporcionada por el usuario. Debido a esto, el SOM aprende a agrupar o mapear sus datos en un número específico de clases [Heaton, 2012]. Esto significa que la red no tendrá en cuenta la relación que existe entre cada objeto y la respuesta verdadera, sino que la red trabaja de manera totalmente independiente [Magallanes, 2011]. Al igual que el PCA y el t-DSNE, el SOM es una herramienta de reducción dimensional para la interpretación de los problemas. Su manera de clasificar los objetos es disponerlos en una superficie cuadrículada y mientras más semejantes sean dos objetos entre sí, estarán más cerca, pudiendo estar en el mismo casillero. En la Figura 4 se exhibe una representación del funcionamiento del mapa de Kohonen.

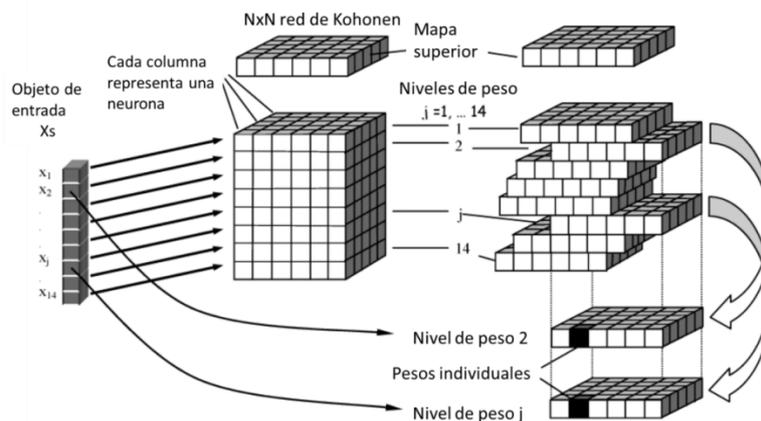


Figura 4: Mapas auto-organizados y la red de Kohonen.

2. DESARROLLO EXPERIMENTAL

2.1. Selección de fresas

Se utilizaron fresas Sandvik Coromill Plura (2P460-OA), una herramienta con un recubrimiento de (Ti,Al)N₂ realizado mediante PVD. Su diámetro aproximado es de 8 mm y la longitud de 63,5 mm.

Se realizó una inspección utilizando un microscopio electrónico de barrido (MEB) buscando determinar el desgaste de las herramientas. A partir de esta caracterización se seleccionaron tres herramientas con desgaste disímil para ser utilizadas durante el ensayo. En la Figura 5a se observa una herramienta con mucho uso, que representa el estado de desgastada (H1); en la Figura 5b se observa una fresa con desgaste intermedio (denominada H2); por último, se seleccionó una sin uso (Figura 5c).

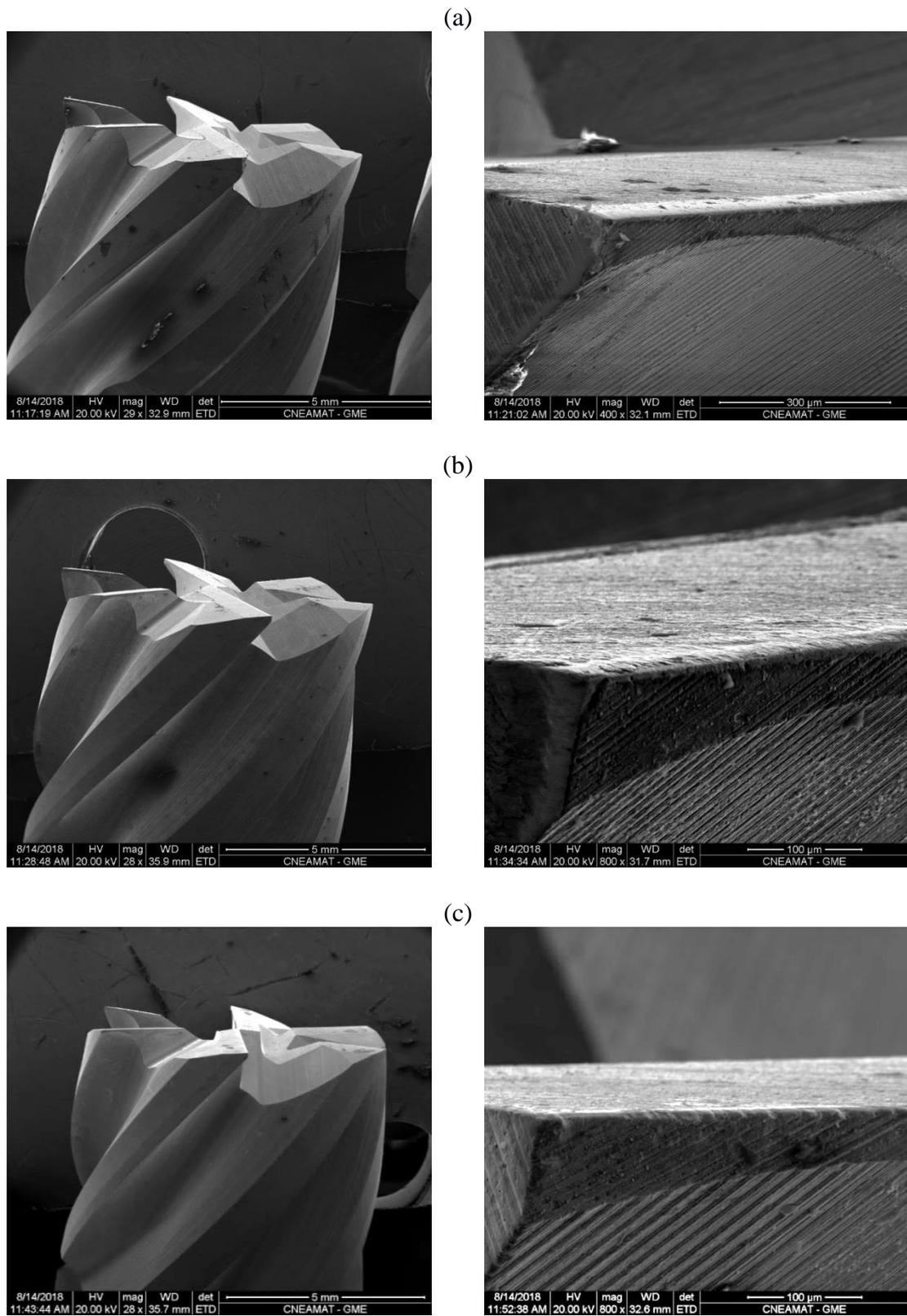


Figura 5: Medición con MEB de la punta de la broca (izquierda) y detalle de uno de sus filamentos (derecha) de H1 (a), H2 (b) y H3 (c).

Si se comparan las tres herramientas, se puede comprobar que la que tiene mayor desgaste tiene un filo menos anguloso y las superficies más lisa. El causante podría ser la interacción entre la herramienta y la viruta de CFRP.

2.2. Confección de probetas

Se realizaron 2 probetas de panel tipo sándwich, con un núcleo tipo panal de abejas de aluminio 5052, con dos caras de multilaminado de CFRP de 24 capas con disposición $[0, 30, 60, 90, -30, -60]_{2S}$ de 1,536 mm de espesor cada una. Las dimensiones de cada probeta fueron de 620 mm de largo por 180 mm de ancho. Sobre cada probeta se efectuaron 8 agujeros como indica la Figura 6. En la probeta 1 se realizó el mecanizado con las fresas H1 y H3 y en la probeta 2 con las H2 y H3. Se utilizó una maquina CNC industrial con una velocidad de avance de 250 mm/min y de rotación 8000 RPM. Se utilizaron dos sensores de EA a 50 mm del borde y así como la distancia entre los agujeros.

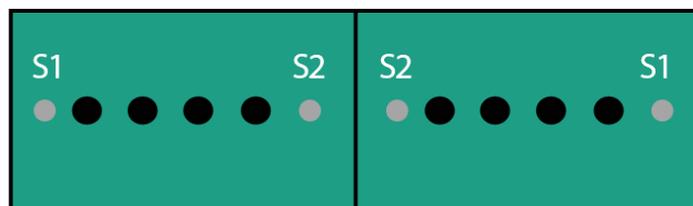


Figura 6: Disposición de los agujeros y sensores sobre las probetas.

Se utilizaron dos sensores de banda ancha y dos preamplificadores de la marca PAC (Physical Acoustics Corporation). Como acoplante entre el panel y los sensores de EA se utilizó vaselina sólida y para fijarlo al mismo, cinta kapton. La adquisición de los datos se realizó con un equipo marca PAC modelo PCI-2, muestreando a 5 MHz y con una resolución de 18 bits en la parametrización. Se utilizaron los modos de adquisición de parámetros característicos de EA y de formas de onda. Los datos fueron almacenados en formato ASCII. Para procesar los datos se utilizó el lenguaje de programación Python. Todos los parámetros de EA obtenidos fueron normalizados según el criterio min-max.

3. RESULTADOS

3.1. Inspección visual del estado de la herramienta

Luego de los ensayos realizados, se realizó una inspección bajo lupa y se observó que a medida que la herramienta se desgasta, acumula mayor cantidad de viruta entre sus filos. En la Figura 7 a y b se puede observar la diferencia entre H1 y H3, respectivamente.

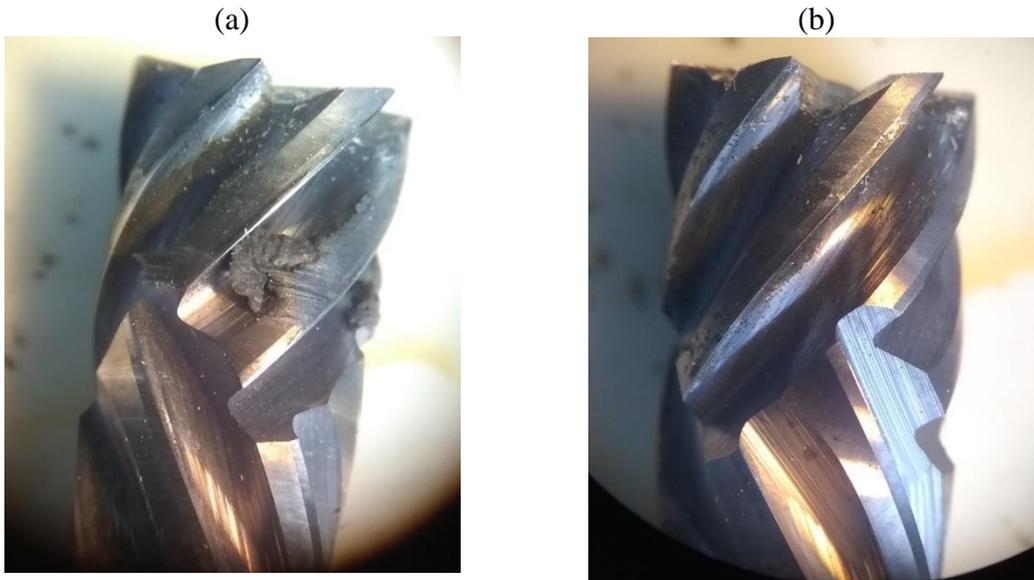


Figura 7: (a) H1 y (b) H2 luego de realizar el mecanizado de los paneles.

3.2. Clasificación del desgaste a partir de algoritmos de reducción de variables

Para la clasificación del desgaste utilizando algoritmos de reducción de variables se utilizó la etapa de fresado de la herramienta. Se debieron descartar los resultados obtenidos por el agujereado ya que es una etapa altamente transitoria y dificulta el análisis de las señales. Se utilizó un filtro de energía en los 70 aJ, considerando que las señales producidas en el mecanizado tienen un alto nivel de energía.

3.2.1. PCA

A partir de la señal normalizada se aplicó el algoritmo de PCA exhibido en la Figura 8. El carácter no lineal de la EA impide que la clasificación sea robusta. Como se puede observar en la Figura 8, se pudo obtener un agrupamiento de los datos con cierto grado de mezcla.

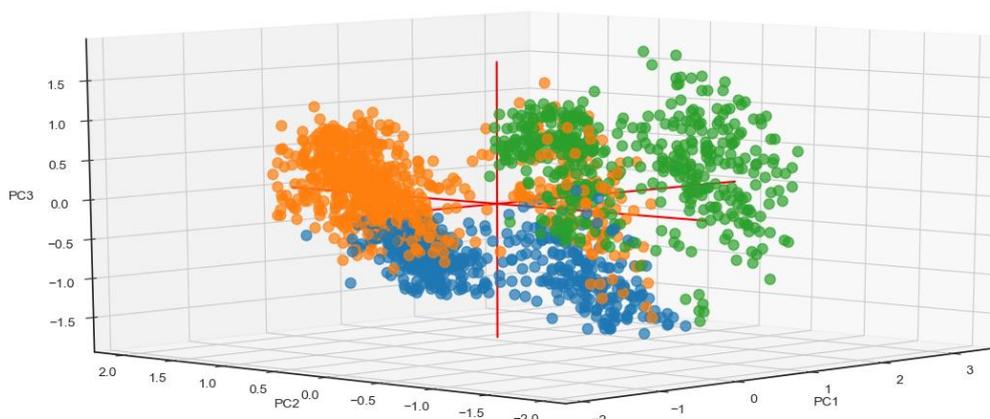


Figura 8: Gráfico de PC en 3 dimensiones utilizando PC1, PC2 y PC3 para la etapa de fresado.

3.2.2. t-DSNE

Aplicando el algoritmo de t-DSNE en la etapa de fresado se observan zonas definidas donde predomina una de las herramientas (Figura 9). Entre los conjuntos de H1 y H3 hay puntos de H2, pero la probabilidad de que se agrupen dentro del que les corresponde es mucho mayor. Los puntos contenidos en este gráfico para cada uno de los grupos se encuentran mucho más concentrados que en el caso de los PC y clasifica de manera más adecuada. Esto se debe al carácter no lineal del algoritmo, lo cual supone una gran ventaja frente al PCA.

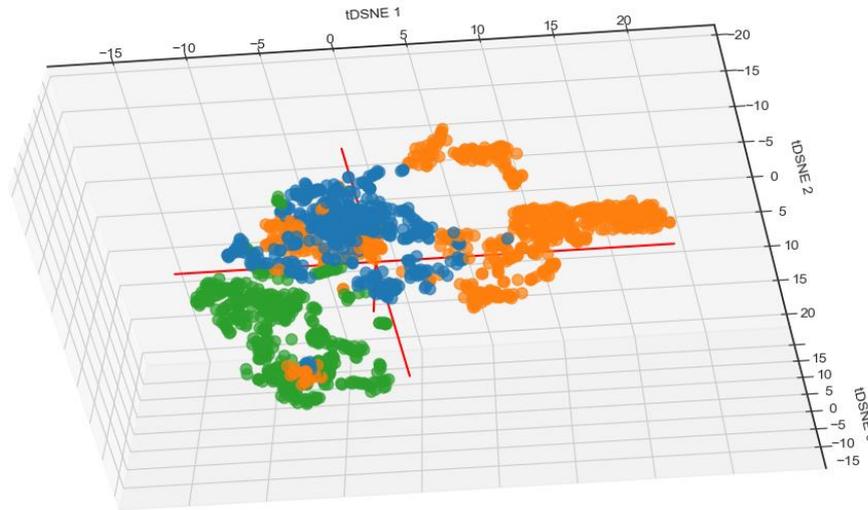


Figura 9: Gráfico de t-DSNE en 3 dimensiones utilizando para la etapa de fresado.

3.2.3. Mapas de Kohonen

Para alimentar la red del mapa de Kohonen se utilizaron 500 muestras para condición de la herramienta y se ingresaron todos los parámetros de EA, con el objetivo de poder visualizar en los mapas de cada una de las variables cuáles resultaban de mayor relevancia. Se separó un grupo de datos para efectuar la predicción. En la Figura 10 se pueden observar 3 zonas topológicas, correspondientes a los 3 desgastes de las herramientas, logrando separar las tres etapas con un cierto grado de mezcla de H2 en los otros dos grupos. Se observa una zona de contacto entre H3 y H2 es mayor que la de H1 y H3, lo cual supone que las primeras tienen mayor grado de similitud que las segundas.

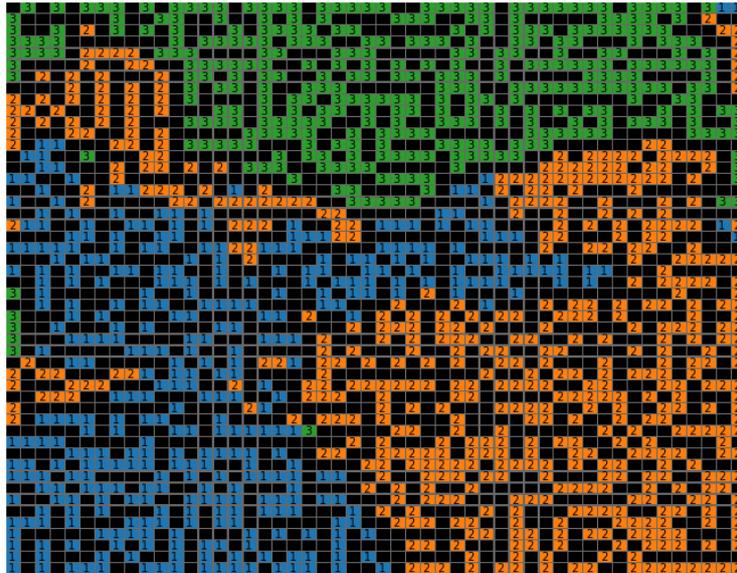


Figura 10: Mapa auto-organizado de entrenamiento para la etapa de fresado.

Se realizó la predicción utilizando 100 muestras para cada caso (Figura 11). El grado de desacierto fue de 9 pesos sobre 70 totales calculados por el SOM a partir del entrenamiento, lo cual implica un error de aproximadamente 12% en las predicciones, lo cual representa un resultado alentador en un primer análisis para la discriminación de distintos desgaste de las herramientas de corte utilizando el SOM.

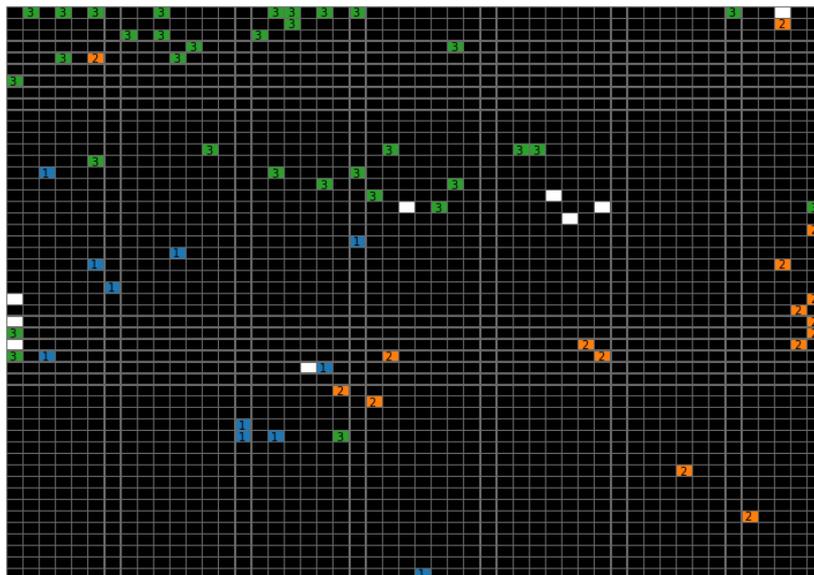


Figura 11: Mapa auto-organizado de entrenamiento para la etapa de fresado.

4. CONCLUSIONES

Se utilizaron tres técnicas de reducción dimensional para estudiar las señales de EA producidas por herramientas de uso aeroespacial con diferente desgaste. Para realizar cada uno de los análisis se utilizó la etapa de fresado ya que los algoritmos resultaron ineficientes en general cuando se analizó la etapa de agujereado, posiblemente, debido a la alta transitoriedad del fenómeno.

Para la etapa de fresado se logró diferenciar el desgaste en cada uno de los análisis realizados. En el caso del PCA se puede observar que, si bien hay cierto grado de mezcla, se pueden diferenciar zonas donde predomina claramente una herramienta o la otra. El t-DSNE permitió separar las distintas herramientas, aunque con un cierto mezclado de parte de H2 sobre las otras herramientas. Por último, se realizó el análisis del desgaste de las herramientas mediante los SOM. Se seleccionó el mapa con mejor agrupamiento de los datos, permitiendo observar zonas claras donde primaban ciertas herramientas sobre las otras. Luego se realizó un mapa de predicción con 100 muestras de cada caso de desgaste (300 en total) y se obtuvieron 70 pesos de los cuales 61 eran correctos, representando un error de aproximadamente 12%, el cual es un resultado satisfactorio para la red desarrollada. Este método de análisis utilizando los SOM resulta más ventajoso que las otras técnicas utilizadas ya que se ve en su totalidad en dos dimensiones y permite visualizar de manera clara el agrupamiento de los datos, siendo a la vez muy fácil de interpretar.

REFERENCIAS

- Bauer, Fabricación de estructuras sándwich, 2006
- Bitzer, T. Honeycomb Technology: Materials, Design, Manufacturing, Applications And Testing, 1997.
- Einasto, M., Saar, E., Einasto, J., Tempel, E., & Tago, E. Principal component analysis, 1–13, 2011.
- Davies, J. M. Lightweight sandwich construction (MPG Books). Manchester: Blackwell Science, 2001.
- Gómez, M. P. Fundamentos de la Emisión Acústica, 2015.
- Grosse, C. U. Acoustic Emission Testing. Acoustic Emission Testing, 2008.
- Heaton, J. Introduction to the math of neural networks. (WordsRu.co, Ed.). Chesterfield: Heaton Research Inc, 2012.
- Hinton, G., & Roweis, S. Stochastic Neighbor Embedding. Advances in Neural Information Processing Systems, 15, 833-840, 2002.
- Magallanes, J., García-Reiriz, A., Liberman, S., & Zupan, J. Kohonen classification applying 'missing variables' criterion to evaluate the p -boronophenylalanine human-body-concentration decreasing profile of boron neutron capture therapy patients. Journal of Chemometrics, 340–347, 2011

PROPAGACIÓN DE ONDAS EN SÓLIDOS ANÍSOTRÓPICOS: PREDICCIÓN DE VELOCIDAD EN POLICRISTALES

Cowes, D. A.^{a,b,c}, Mieza, J. I.^{b,c,d}, Gómez, M. P.^{a,b,e}

^a Proyecto ICES, GDTyPE, CNEA, ARGENTINA

^b Instituto Sabato, CNEA, Universidad Nacional de San Martín, ARGENTINA

^c Ingeniería de Sonido, Universidad Nacional de Tres de Febrero, ARGENTINA

^d División Hidrógeno en Materiales, CNEA, ARGENTINA

^e Departamento Mecánica, FRD, Universidad Tecnológica Nacional, Campana, ARGENTINA

e-mail: diegocowes@cnea.gov.ar

RESUMEN

Las propiedades elásticas de los monocristales están determinadas por su tensor de constantes elásticas, a partir del cual se puede deducir la velocidad del sonido en función del vector de onda. Los materiales usualmente utilizados en ingeniería son policristalinos, es decir que se conforman por la aglomeración de monocristales. De modo que la velocidad del sonido en este caso estará determinada por la distribución de orientaciones de los monocristales que compongan al policristal (textura cristalográfica). A partir de esta relación es posible resolver dos problemas: si se conoce la orientación relativa de los monocristales es posible predecir la velocidad en función del vector de onda para el policristal; o si se conocen las velocidades del policristal es posible estimar la orientación relativa de los monocristales. En este trabajo se abordaron estos problemas a través de la convolución espacial expresada como operaciones de Armónicas Esféricas. Se obtuvieron resultados experimentales en aleaciones de Zr que fueron validados a través de mediciones de Difracción de Rayos X.

Palabras Clave: Constantes elásticas, Ultrasonido, Textura, Circonio.

1. INTRODUCCIÓN

Las aleaciones de circonio, ampliamente utilizadas en la industria nuclear, adquieren texturas marcadas durante su conformado termo-mecánico a causa de la anisotropía propia del monocristal. En particular, la textura del Zr influye en mecanismos tales como la corrosión nodular, corrosión bajo tensión, dirección de crecimiento de plaquetas de hidruros, tensión y crecimiento por irradiación (Anderson et al., 1999). Por lo tanto, esta debe ser caracterizada y controlada durante el proceso de fabricación para poder garantizar el comportamiento seguro durante la vida útil del componente. Usualmente, la textura se caracteriza por medio de técnicas como difracción rayos X, difracción de neutrones o difracción de electrones por retro-dispersión, las cuales requieren equipos costosos y una exhaustiva preparación de muestras. Dado que la textura se evidencia como anisotropía mecánica de los materiales, la propagación de ondas elásticas puede ser utilizada para la caracterización de la misma, resultando una técnica más económica y con menos recaudos para su aplicación. Distintos trabajos han intentado caracterizar la textura por medio de la anisotropía observada en la propagación de ondas elásticas con limitado grado de éxito. Sin embargo, recientemente se publicó una línea de investigación que logra buena correlación entre mediciones por difracción de neutrones y mediciones por pulsos ultrasónicos a partir del análisis por armónicos esféricos (Lan et al., 2018). Se

plantean dos problemas, el directo, el cual a partir de la convolución de velocidades de un mono-cristal en función de la dirección (*kernel*) y la función de distribución de orientaciones (ODF) encuentra las velocidades para un poli-cristal; y el indirecto, el cual a partir de la de-convolución entre las velocidades del poli-cristal y el *kernel* encuentra la ODF. Si bien el problema inverso es el que tiene relevancia tecnológica, en este trabajo se implementó el problema directo como primera aproximación al método. Para esto se calculó el *kernel* para Zry-4, se obtuvo la ODF a partir de mediciones por difracción de rayos X (DRX) de una barra laminada de Zry-4 y se obtuvieron las velocidades del poli-cristal. Los resultados fueron contrastados con la medición ultrasónica para tres direcciones representativas.

2. MÉTODOS

La ecuación 1 muestra que la velocidad de un policristal v en función del ángulo de incidencia θ equivale a la convolución entre la función de distribución de orientaciones g y la velocidad de un monocristal (*kernel*) f en función de la dirección (Lan et al., 2018)

$$v(\theta) = \int_0^\pi f(\theta - \phi)g(\phi)d\phi \quad (1)$$

Si se extiende el análisis al espacio tridimensional (α, β) , y se aproximan las funciones a partir de armónicos esféricos se obtiene la ecuación 2 donde K_{l0} son los coeficientes de la expansión de las velocidades para el monocristal, Q_{lm} son los coeficientes de la expansión para la ODF, e Y_{lm} es la base de armónicos esféricos. De esta ecuación se observa que la convolución expresada en la ecuación 1 se convierte en una sumatoria de productos de mayor facilidad para su cálculo y permite resolver el problema directo de manera sencilla.

$$v(\alpha, \beta) = \sqrt{\frac{4\pi}{2l+1}} K_{l0} Q_{lm} Y_{lm}(\alpha, \beta) \quad (2)$$

Para encontrar la velocidad en función de la orientación para el monocristal (o *kernel*) es necesario conocer el tensor de constantes elásticas del material. En este caso se utilizó el del Zry-4 de (Weck et al., 2015) cuyas constantes independientes se incluyen en la tabla 2 del Anexo. Luego se aplicó la ecuación de Christoffel (3), cuya solución propuesta evaluada para distintas direcciones se resuelve como un problema de autovalores y autovectores que se expresa en la ecuación 4 (Rose, 1999).

$$\rho \frac{\partial^2 u_i}{\partial t^2} = C_{ijkl} \frac{\partial^2 u_l}{\partial x_j \partial x_k} \quad (3)$$

$$|\Lambda_{il} - v^2 \delta_{il}| = 0 \quad (4)$$

Luego se realizó la proyección de dicha función en armónicos esféricos haciendo uso de la herramienta MTEX para MATLAB y se obtuvieron los coeficientes del desarrollo orden 6. El *kernel* evaluado en función de la dirección se muestra en la Figura 1.a. y los coeficientes se incluyen en la tabla 3 del Anexo.

La textura se caracterizó por mediciones de DRX para el polo 0001 en tres direcciones principales de una barra laminada de Zry-4: la dirección de laminación (RD), la dirección normal a la laminación (ND) y la dirección tangencial a la laminación (TD). Las figuras de polos fueron procesadas también dentro de MTEX y se proyectaron en armónicos esféricos obteniendo la ODF en coeficientes de hasta orden 6. La ODF evaluada en función de la dirección se muestra en la Figura 1.b. y los coeficientes se incluyen en la tabla 3 del anexo.

A partir de los coeficientes del *kernel*, y de los coeficientes de la ODF, se aplicó la ecuación 2 y se obtuvieron los coeficientes de las velocidades del poli-cristal. En la Figura 1.c se muestra el resultado evaluado en función de la dirección y los coeficientes se incluyen en la tabla 3 del anexo.

Por último, para validar el método se realizaron mediciones ultrasónicas en la barra laminada de Zry-4 en las tres direcciones principales (ND, TD, RD) a través del método presentado en (Cowes, 2017) el cual consiste en pulso eco a 10 MHz de banda angosta aplicado con un transductor piezoeléctrico de cuarzo por contacto.

3. RESULTADOS

Los resultados se incluyen en la Tabla 1, donde se comparan con los calculados y se muestra el error. Se observa un error de alrededor de 200 m/s el cual se puede deber a que la técnica DRX es superficial mientras que la propagación de ondas es un fenómeno volumétrico. Sin embargo, es un error porcentual aceptable de alrededor del 4%.

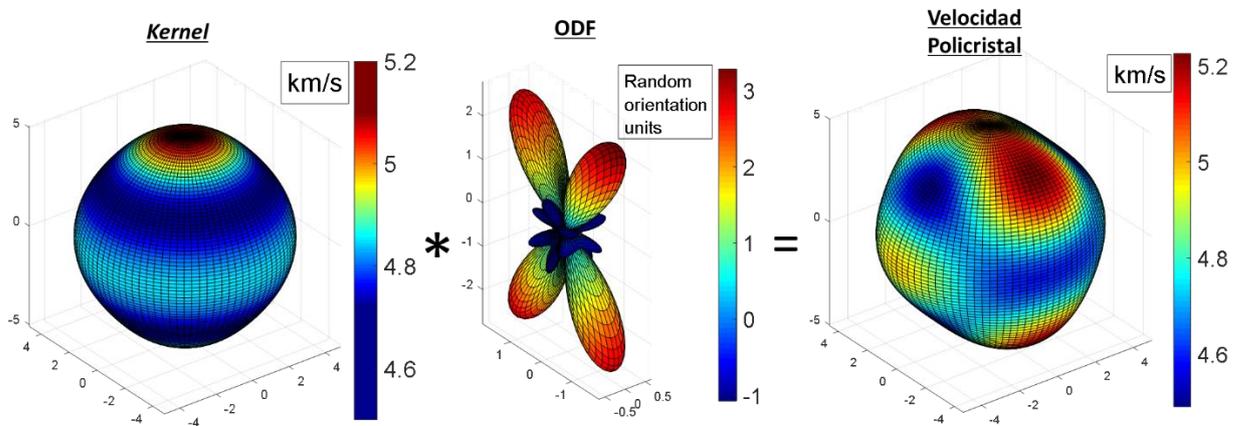


Figura 1. Funciones evaluadas en función de la dirección.

Tabla 1. Resultados de cálculo y de medición

Dirección	Velocidad medida (m/s)	Velocidad calculada (m/s)	Error Absoluto (m/s)	Error Porcentual (%)
ND	4811,3	5030,1	218,8	4,5
TD	4697,0	4601,9	95,1	2,0
RD	4688,2	4963,8	275,6	5,9

4. CONCLUSIONES

Se logró implementar el modelo directo por el cual conociendo el *kernel* y la ODF de una probeta se puede obtener la velocidad del poli-cristal en función de la dirección. Se observa un error de alrededor de 200 m/s el cual se puede deber a que la técnica DRX es superficial mientras que la propagación de ondas es un fenómeno volumétrico. En este contexto validar los resultados con difracción de neutrones podría reducir dicho error. Por otro lado, el problema directo es el de relevancia tecnológica por lo que se debe construir un dispositivo capaz de medir la velocidad de muestras policristalinas en distintas direcciones para luego poder obtener la textura cristalográfica.

REFERENCIAS

- Anderson A.J., Thompson R.B., Cook C.S., Ultrasonic measurement of the Kearns texture factors in zircaloy, zirconium, and titanium, *Metall. Mater. Trans. A*. 1999, 30:1981-1988.
- Cowes, D. A. *Técnicas de ultrasonido para la determinación del contenido de H en aleaciones de Zr. Tesis de Magister en Ciencia y Tecnología de Materiales*, Instituto Sabato, UNSAM, Argentina. 2018.
- Lan B., Lowe M.J.S., Dunne F.P.E., A spherical harmonic approach for the determination of HCP texture from ultrasound: a solution to the inverse problem, *J. Mech. Phys. Solid*. 2015, 83:179-198.
- Rose J.L. *Ultrasonic waves in solid media*. Cambridge: Cambridge University Press; 1999. p. 27.
- Weck P. F., Kimb E., Tikarea V., Mitchell J. A., Mechanical properties of zirconium alloys and zirconium hydrides predicted from density functional perturbation theory, *Dalton Transactions* 2015, 43:18769-18779.

5. ANEXO

Tabla 2. Constantes elásticas de Zry-4.

Módulos elásticos Zry-4 (GPa)				
C ₁₁	C ₁₂	C ₁₃	C ₃₃	C ₄₄
153,2	65	69,3	169,7	30,8

Tabla 3. Coeficientes de las funciones proyectadas por Armónicos Esféricos.

orden	grado	kernel		ODF		Poli-cristal	
		real	imaginario	real	imaginario	real	imaginario
(l)	(m)						
0	0	1.7E+01	0.0E+00	1.0E+00	0.0E+00	1.7E+01	0.0E+00
1	-1	0.0E+00	0.0E+00	7.0E-09	6.7E-09	0.0E+00	0.0E+00
1	0	0.0E+00	0.0E+00	-2.0E-08	-3.5E-19	0.0E+00	0.0E+00
1	1	0.0E+00	0.0E+00	7.0E-09	-6.7E-09	0.0E+00	0.0E+00
2	-2	2.2E-15	-2.7E-17	-5.9E-01	4.7E-02	-8.3E-02	6.6E-03
2	-1	1.5E-17	2.5E-16	-1.1E-01	-1.0E-01	-1.5E-02	-1.4E-02
2	0	1.4E-01	1.2E-16	1.9E+00	9.3E-18	2.7E-01	-2.3E-16
2	1	5.9E-17	-2.3E-16	-1.1E-01	1.0E-01	-1.5E-02	1.4E-02
2	2	2.2E-15	2.7E-17	-5.9E-01	-4.7E-02	-8.3E-02	-6.6E-03
3	-3	0.0E+00	0.0E+00	-5.2E-09	-1.6E-09	0.0E+00	0.0E+00
3	-2	0.0E+00	0.0E+00	9.4E-09	7.5E-09	0.0E+00	0.0E+00
3	-1	0.0E+00	0.0E+00	7.7E-09	5.7E-10	0.0E+00	0.0E+00

3	0	0.0E+00	0.0E+00	-6.2E-09	6.1E-19	0.0E+00	0.0E+00
3	1	0.0E+00	0.0E+00	7.7E-09	-5.7E-10	0.0E+00	0.0E+00
3	2	0.0E+00	0.0E+00	9.4E-09	-7.5E-09	0.0E+00	0.0E+00
3	3	0.0E+00	0.0E+00	-5.2E-09	1.6E-09	0.0E+00	0.0E+00
4	-4	9.1E-16	2.5E-17	1.8E-01	-3.7E-03	4.6E-02	-9.7E-04
4	-3	-5.3E-17	1.3E-16	1.2E-01	8.3E-02	3.1E-02	2.2E-02
4	-2	7.8E-16	-8.2E-17	-1.4E+00	1.6E-01	-3.7E-01	4.3E-02
4	-1	-1.5E-16	-6.5E-17	-1.1E-01	-2.0E-02	-2.9E-02	-5.4E-03
4	0	2.6E-01	1.2E-16	2.3E-01	-3.0E-18	5.9E-02	-2.8E-17
4	1	-1.3E-16	8.1E-17	-1.1E-01	2.0E-02	-2.9E-02	5.4E-03
4	2	7.8E-16	8.4E-17	-1.4E+00	-1.6E-01	-3.7E-01	-4.3E-02
4	3	-3.5E-18	-1.2E-16	1.2E-01	-8.3E-02	3.1E-02	-2.2E-02
4	4	9.2E-16	-2.1E-17	1.8E-01	3.7E-03	4.6E-02	9.7E-04
5	-5	0.0E+00	0.0E+00	1.4E-09	-1.3E-09	0.0E+00	0.0E+00
5	-4	0.0E+00	0.0E+00	-3.9E-09	-1.0E-08	0.0E+00	0.0E+00
5	-3	0.0E+00	0.0E+00	-7.1E-11	9.7E-11	0.0E+00	0.0E+00
5	-2	0.0E+00	0.0E+00	1.3E-08	-4.1E-09	0.0E+00	0.0E+00
5	-1	0.0E+00	0.0E+00	2.6E-09	-7.7E-12	0.0E+00	0.0E+00
5	0	0.0E+00	0.0E+00	6.7E-09	4.2E-17	0.0E+00	0.0E+00
5	1	0.0E+00	0.0E+00	2.6E-09	7.7E-12	0.0E+00	0.0E+00
5	2	0.0E+00	0.0E+00	1.3E-08	4.1E-09	0.0E+00	0.0E+00
5	3	0.0E+00	0.0E+00	-7.1E-11	-9.7E-11	0.0E+00	0.0E+00
5	4	0.0E+00	0.0E+00	-3.9E-09	1.0E-08	0.0E+00	0.0E+00
5	5	0.0E+00	0.0E+00	1.4E-09	1.3E-09	0.0E+00	0.0E+00
6	-6	3.7E-09	7.1E-18	-7.0E-02	-2.5E-02	5.6E-04	2.0E-04
6	-5	-3.3E-17	6.9E-17	-3.9E-02	-5.6E-02	3.1E-04	4.5E-04
6	-4	3.2E-16	-4.7E-17	3.6E-01	-2.0E-01	-2.9E-03	1.6E-03
6	-3	5.7E-17	-2.2E-16	2.1E-01	7.3E-02	-1.7E-03	-5.9E-04
6	-2	5.0E-16	-1.6E-16	-1.1E+00	4.0E-02	9.0E-03	-3.2E-04
6	-1	-1.1E-16	3.6E-17	-1.7E-03	1.2E-01	1.4E-05	-9.6E-04
6	0	-8.0E-03	9.6E-17	-8.8E-01	5.4E-17	7.1E-03	8.5E-17
6	1	-9.7E-17	-2.4E-17	-1.7E-03	-1.2E-01	1.4E-05	9.6E-04
6	2	5.0E-16	1.6E-16	-1.1E+00	-4.0E-02	9.0E-03	3.2E-04
6	3	9.0E-17	2.1E-16	2.1E-01	-7.3E-02	-1.7E-03	5.9E-04
6	4	3.1E-16	4.8E-17	3.6E-01	2.0E-01	-2.9E-03	-1.6E-03
6	5	-1.7E-17	-9.6E-17	-3.9E-02	5.6E-02	3.1E-04	-4.5E-04
6	6	3.7E-09	2.9E-19	-7.0E-02	2.5E-02	5.6E-04	-2.0E-04

METODOLOGÍA PARA ESTIMAR LA INFLUENCIA DE EVENTOS ANÓMALOS EN LOS NIVELES DE RUIDO DEL TRÁNSITO RODADO DE LA CIUDAD AUTÓNOMA DE BUENOS AIRES

Crapa M. N.^a, Mansilla J. ^a, Zanardi E. ^{a,b}, Lombera E.^a

^aGrupo de Investigación en Ruido Ambiental, Departamento de Ciencia y Tecnología, Universidad Nacional de Tres de Febrero, ARGENTINA

^bDepartamento de Ingeniería, Decibel Sudamericana S.A, ARGENTINA

e-mail: martin.crapa@gmail.com

RESUMEN

El presente trabajo describe una metodología utilizada para estudiar la influencia de ruidos anómalos generados por el tránsito rodado en la contaminación acústica total de una zona de la Ciudad Autónoma de Buenos Aires (C.A.B.A.). Para ello, se realizó una medición in situ de 8 horas de duración sobre una avenida bajo las condiciones establecidas en la normativa ISO 1996-2:1987. En primer lugar, se llevó a cabo un reconocimiento de todos aquellos eventos sonoros del tránsito vehicular ajeno al ruido de motor y de rodadura. En segundo lugar, se creó una base de datos de todos los eventos encontrados (bocinas, sistemas de frenado, sirenas, escapes liberados, etc.), en función de su LAeq y duración, con el fin de realizar un análisis estadístico. Luego, se estimó de manera teórica la influencia en el LAeq provocada por cada tipo de evento individualmente. Finalmente, se propone un análisis empírico más profundo basado en la emulación de escenarios sonoros ficticios y la manipulación controlada de los registros de audio de la base de datos creada. De los resultados provisionarios obtenidos, se concluyó que la presencia de algunos eventos puede llegar a modificar los niveles de presión sonora de la vía pública y que es posible modelar un sistema capaz de estudiar la influencia de los mismos en la contaminación acústica de una zona determinada.

Palabras Clave: Eventos Anómalos, Ruido Ambiental, Contaminación Acústica.

1. INTRODUCCIÓN

Las problemáticas generadas por la contaminación sonora, llevaron a diferentes ciudades del mundo al punto de tomar medidas para monitorear y gestionar el ruido ambiental. Uno de los métodos más utilizados por su practicidad, costo y tiempo de ejecución, es la elaboración de mapas de ruido a través de programas de simulación por computadora basados en diferentes modelos acústicos. Estos modelos, contemplan principalmente al ruido de rodadura y de propulsión del parque automotor. Algunos pocos países como Francia (SÉTRA, 2008), Inglaterra (HMSO, 1975) y Alemania (BM für Verkehr, 1990) cuentan con modelos propios de predicción de ruido de tránsito rodado diseñados según sus realidades urbanísticas y tecnológicas tales como su flota vehicular, sus carreteras, su infraestructura urbana y demás. Sin embargo, hay una gran cantidad de países que aún no cuentan con modelos propios, por lo que terminan adoptando modelos ya existentes. En el caso de Argentina, la Ley N°1.540 (Gobierno de la Ciudad de Buenos Aires, 2004) en su Decreto reglamentario N°740-07 (Gobierno de la Ciudad de Buenos Aires, 2007)

especifica adoptar el modelo francés NMPB-Routes-1996 (SÉTRA-CERTULCPC-CSTB, 1996). El problema aquí, es que tanto en Buenos Aires (Stasi, A., 2017) como en otras tantas ciudades Latinoamericanas (González, E. A., et al, 2000) se han encontrado algunas discrepancias entre los resultados obtenidos mediante los modelos simulados y los valores recolectados por mediciones in situ. Por ende, la adopción de modelos de cálculo generados en otras regiones, no siempre terminan reflejando con fidelidad la realidad sonora de aquellos núcleos urbanos en donde se los aplica.

Algunos especialistas creen que la principal causa de esta divergencia se debe a que las realidades de estas ciudades son muy diferentes al de aquellas en donde fueron elaborados los modelos que adoptan (González, E. A., 2008). Más aún, no sólo asocian esta falta de correlación a la diferencia tecnológica de los vehículos, el diseño de las ciudades y sus carreteras, sino también al estilo de vida o costumbres culturales que conducen a la presencia de una serie de eventos que terminan influyendo en los niveles medidos. A este tipo de sucesos los identificamos como Eventos Anómalos (EA) y los definimos como todos aquellos eventos de ruido que, siendo parte del ambiente sonoro de un área urbana, no pertenecen pura y exclusivamente ni al ruido de motor, ni al de rodadura del tránsito vehicular. Alguno de estos eventos puede ser ruidos de bocinas, sirenas, caños de escape liberados, música a alto nivel, compresión y descompresión de aire de sistemas neumáticos de frenos y de puertas (utilizados en autobuses y en otros vehículos pesados), alarmas, entre otros.

A lo largo de los últimos veinte años, diversos investigadores han ido estudiando la problemática y desarrollando métodos para cuantificar el impacto de estos eventos en el nivel de ruido, e incluso incluirlos dentro de un modelo predictivo de ruido de tránsito. En el año 2000, se desarrolló un modelo predictivo adaptado a la ciudad de Montevideo (González, A. E., et al, 2000), definiendo a los eventos anómalos bajo un criterio objetivo que permitiera detectarlos. Con ello, se logró obtener un modelo que se ajustase a la realidad de la ciudad colocando a más del 90% de los valores simulados dentro de un rango de ± 3 dB. Años más tarde, en una publicación sobre el uso de tres parámetros para caracterizar la composición temporal de espacios sonoros urbanos (Torija, A. J., et al, 2011) se desarrolló una herramienta para identificar eventos anómalos utilizando el factor de cresta y el LA90 de una señal de ruido de tránsito. Por último, en el artículo de Orga, F., et al, 2017, se llevó a cabo un estudio sobre el impacto de los eventos anómalos en el nivel de ruido de áreas urbanas y suburbanas de algunas ciudades europeas, con el principal objetivo de hallar argumentos lógicos, reales y mensurables para justificar la necesidad de remover estos eventos de las mediciones, previo al cálculo para la generación de los mapas de ruido. Estos especialistas, afirman que esta clase de eventos sesgan los niveles de ruido de sus mapas.

Es por estos antecedentes, sumado a que en los últimos años ha existido un interés creciente por el estudio de la contaminación sonora y la gestión del ruido urbano en la C.A.B.A., que se decidió llevar a cabo una investigación en donde se lograra identificar, medir y caracterizar los eventos de ruido anómalos más habituales en el tránsito vehicular de un punto de la ciudad, para luego diseñar una metodología que permita estimar su influencia en los niveles de ruido.

2. MÉTODOLÓGÍA

2.1. ADQUISICIÓN DE REGISTROS SONOROS

Esta etapa de la investigación, consistió en el diseño de una medición para la adquisición del registro de ruido del tránsito rodado. El objetivo, fue principalmente conocer la composición sonora del ruido urbano de un punto de la ciudad durante una jornada laboral habitual, su variación a lo largo de la misma, la cantidad y el tipo de eventos anómalos que pueden encontrarse.

La medición se llevó a cabo en el barrio de Floresta en la Ciudad Autónoma de Buenos Aires (C.A.B.A.), sobre una avenida pavimentada de dos carriles, mano única, marcada por momentos de tránsito fluido a velocidad media (hasta 60 km/h) y otros, de gran congestión y flujo vehicular intermitente. Ambas condiciones muy dependientes del horario y de un paso a nivel ubicado en las proximidades del punto de evaluación (a unos 100 m de distancia). La grabación del registro de audio, se realizó durante un período diurno a lo largo de 8 horas de manera continua, entre las 11:00 y las 19:00 horas.



Fig. 1 – Fotografía del punto de medición.

Para su adquisición, se empleó un sonómetro integrador SVAN959 con un micrófono GRAS 40AE fijado con un trípode a 4 m de altura sobre la calzada para simular una condición de campo libre en concordancia con las especificaciones de la normativa ISO 1996-2:2007 (ISO, 1996). Además, se utilizó un protector anti viento para el micrófono y se lo orientó hacia la arteria vehicular (ver **Fig. 1**). El audio grabado por el sonómetro fue almacenado en un pendrive, en un archivo con formato *.wav*, a una frecuencia de muestreo de 48 kHz y una profundidad de 16 bits/muestra. Adicionalmente, se grabó un tono puro de 1 kHz a 94 dB generado por un calibrador SV 30 A, de forma tal de ser utilizado como tono de referencia y calibración para la etapa de procesamiento posterior. Por último, también se grabó un video en simultáneo, de manera de tener un registro visual ante eventuales situaciones irregulares que pudiesen transcurrir durante la medición y para llevar un conteo más preciso del caudal vehicular.

Finalmente, los resultados de la medición otorgaron un LAeq,1h promedio de 68 dBA.

2.2. BASE DE DATOS

La segunda etapa, consistió en la creación de una base de datos clasificada a partir de la observación del registro sonoro principal y la detección, edición y almacenamiento de los segmentos de audio que contenían eventos anómalos de ruido perceptibles.

La base de datos, no es más que una gran cantidad de registros de audio ordenados según una clasificación específica que responde a si el segmento de audio es de ruido de tránsito (RDT) o un evento anómalo (EA). A su vez, éstos últimos, fueron etiquetados y almacenados en carpetas, agrupándolos en 17 subcategorías según su tipo. Algunas de

estas clasificaciones (ver **Tabla I**) fueron inspiradas en las taxonomías definidas en el artículo de Orga, F., 2017, presentado en Londres.

Tabla I – Clasificación de los eventos anómalos según su taxonomía.

ALAR:	alarmas de vehículos.
AVES:	canto de aves.
BICI:	bicicletas
BOCI:	bocinas de vehículos.
CAMN:	ruido de caja de camiones, cadenas y otros elementos sueltos en ellos.
ESCP:	ruido de caño de escape liberado.
FRNL:	ruido de frenos de automóviles y vehículos livianos.
FRNP:	ruido de frenos de colectivos y otros vehículos pesados.
LADR:	ladrido de perros.
MOTO:	ruido de pasaje de motos
MUSI:	música en vehículos y en vía pública a altos niveles.
OTRO:	Otros ruidos varios.
PERS:	conversaciones, gritos y otros ruidos provocados por peatones en la vía pública.
PUER:	ruido de cierre de puertas de casas, de vehículos y otros.
SIRE:	sirenas de ambulancias, policías, bomberos, etc.
SISN:	descompresión de aire de sistemas neumáticos de frenos y puertas de autobuses y de otros vehículos pesados.
TREN:	ruido de bocina y pasaje del tren.

En esta etapa pueden distinguirse tres fases principales. La *detección*, que consiste en localizar a lo largo de la medición completa las diferentes categorías anteriormente mencionadas. La *edición*, en donde se buscó delimitar todos los segmentos de audio, definiendo el inicio y final de cada uno de ellos. Y, por último, el *almacenamiento* en donde se generaron los archivos de audio a partir de los segmentos previamente detectados y editados (es decir, las muestras). A estos se los clasificó según correspondía, etiquetándolos y guardándolos en carpetas de acuerdo a su categoría. De esta manera, se creó la base de datos de eventos anómalos que fue utilizada para el procesamiento y el análisis posterior.

En cuanto al criterio de detección de los EA, sólo se consideraron aquellos EA que fuesen claramente perceptibles tanto auditiva como visualmente. Es decir, que al ser reproducidos pudieran ser reconocidos auditivamente, y que al ser observados en la forma de onda del audio pudieran también ser distinguidos de manera visual. De modo tal, que tanto su inicio como final pudiesen ser delimitados manualmente con una precisión razonable. Un proceso similar al descrito en el artículo de Alías, F. y Socoró, J. C., 2017. Al mismo tiempo, se decidió definir 50 ms como duración mínima para un EA, puesto que se ha detectado durante algunas pruebas previas, que ese valor es un mínimo práctico para una percepción clara y distinguible del mismo. Eventos de menor duración fueron subestimados en este estudio.

3. RESULTADOS

3.1. ANÁLISIS DE BASE DE DATOS

Luego de haber confeccionado una Base de Datos completa con todos los eventos anómalos percibidos en la medición, se realizó un primer análisis de donde se recolectaron las siguientes estadísticas. En primera instancia, se buscó obtener la cantidad de eventos a lo largo de toda la medición (ver **Tabla II**).

Tabla II – Cantidad de eventos anómalos por hora según categoría.

EVENTOS	SUBTOTALES	RANGOS HORARIOS (hs)							
		11-12	12-13	13-14	14-15	15-16	16-17	17-18	18-19
SISN	117	38	18	6	4	2	16	21	12
ALAR	30	5	4	2	3	9	1	4	2
BICI	1	0	1	0	0	0	0	0	0
AVES	22	7	2	1	2	3	2	4	1
FRNP	71	14	3	6	7	4	15	8	14
FRNL	106	20	8	3	6	11	13	30	15
LADR	50	21	18	1	1	2	6	0	1
PUER	44	5	13	9	5	4	1	3	4
BOCI	297	37	29	28	30	26	36	59	52
MOTO	11	6	4	0	0	0	0	0	1
MUSI	7	2	0	0	1	0	1	2	1
OTRO	8	2	4	0	1	0	0	1	0
PERS	123	12	31	2	3	2	3	3	67
SIRE	12	0	1	4	5	1	0	0	1
ESCP	7	4	1	0	0	1	0	0	1
TREN	6	3	1	0	0	1	1	0	0
CAMN	71	23	9	17	9	6	2	4	1
TOTALES	983	199	147	79	77	72	97	139	173

En la **Tabla II**, se observa un predominio de bocinas (BOCI) que se distinguen en número de apariciones por sobre los demás eventos. Los ruidos de compresión y descompresión de aire de sistemas neumáticos de vehículos pesados (SISN), los chirridos debido a frenos de vehículos livianos (FRNL) y los ruidos provocados por personas en la vía pública son otros de los tipos de eventos que también se observan en cantidades abultadas a lo largo del registro. Sin embargo, estos últimos poseen una frecuencia de aparición menor a la mitad del número de bocinas registradas en las 8 horas de medición. Otros eventos que poseen una frecuencia de aparición menor, pero que aún así presentan al menos una aparición cada 10 minutos, son aquellos pertenecientes a los grupos CAMN, FRNP y LADR.

Al agrupar todos los eventos encontrados y estudiar su evolución temporal, se observa una clara dependencia del rango horario. En la **Fig. 2**, se puede distinguir como aumenta considerablemente la cantidad de eventos hacia los horarios picos y como disminuye en horarios de baja actividad.

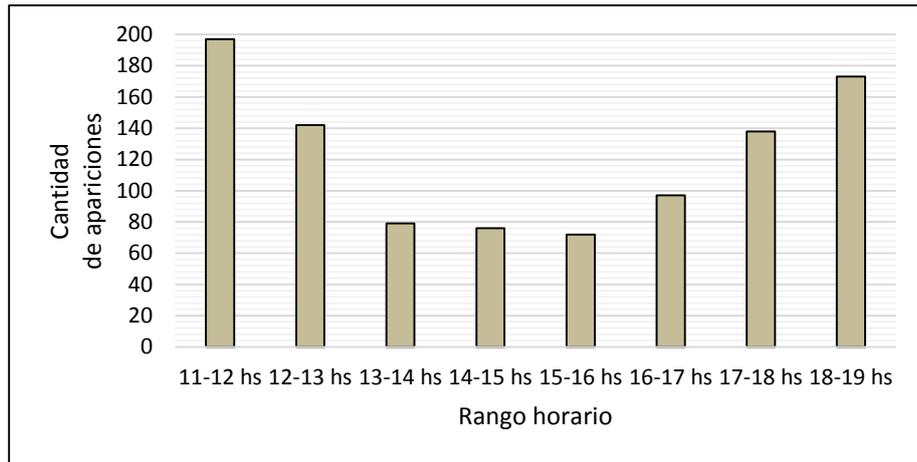


Fig. 2 – Cantidades totales de eventos por hora.

Dada la cantidad de tipos diferentes de EA, es interesante estudiar el nivel promedio de cada uno de ellos. La **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** nos da una idea de los niveles de cada clase y que tanta dispersión tiene cada una de ellas.

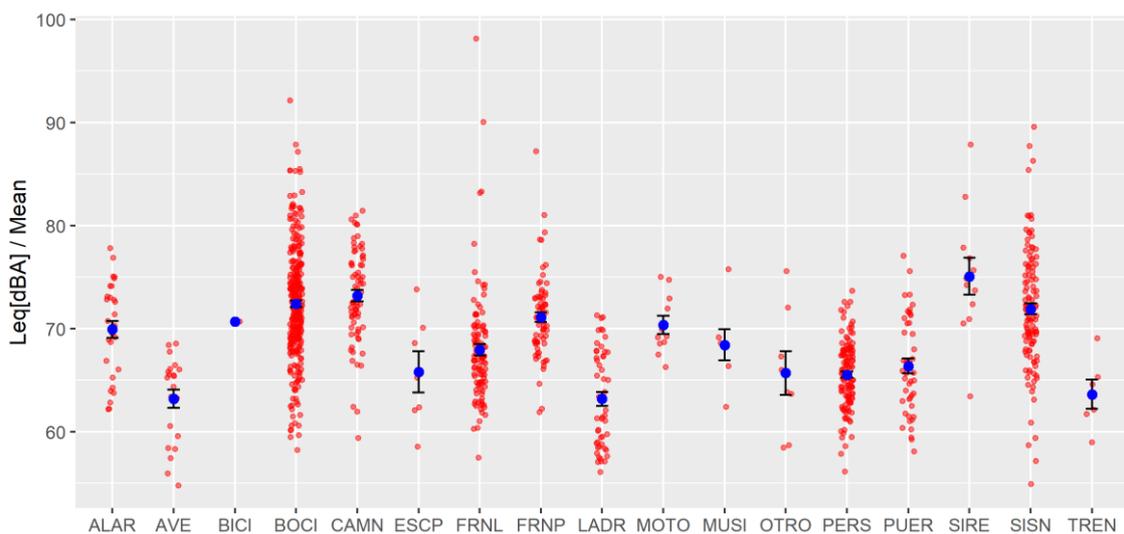


Fig. 3 – Leq (dBA) \pm error estándar de cada clase de evento (azul) en conjunto a los resultados individuales (rojo).

Considerando que el nivel promedio de la medición completa se encuentra en torno a los 68 dBA, podemos destacar algunas categorías de eventos cuyos niveles promedios se encuentran por encima de este valor. Así pues, se puede apreciar en la **Fig. 3** cómo 7 de las 17 categorías de eventos superan esta referencia de ruido. Las categorías que poseen las mayores magnitudes son SIRE, CAMN y BOCI, presentando un SPL medio de alrededor de unos 5 dB por encima de los 68 dBA de ruido de tránsito (RDT). Luego, les siguen los eventos pertenecientes a las categorías SISR y FRNP con 4 dB por encima del RDT. Por último, se encuentran los eventos de tipo ALAR y MOTO superando apenas unos 2 dB al ruido de tránsito.

Continuando con el análisis, también resulta igual de importante analizar la duración de los eventos a la hora de estudiar su impacto en el LAeq total. Es por eso que en la **Fig. 4** se presenta un gráfico donde se evalúa esta característica.

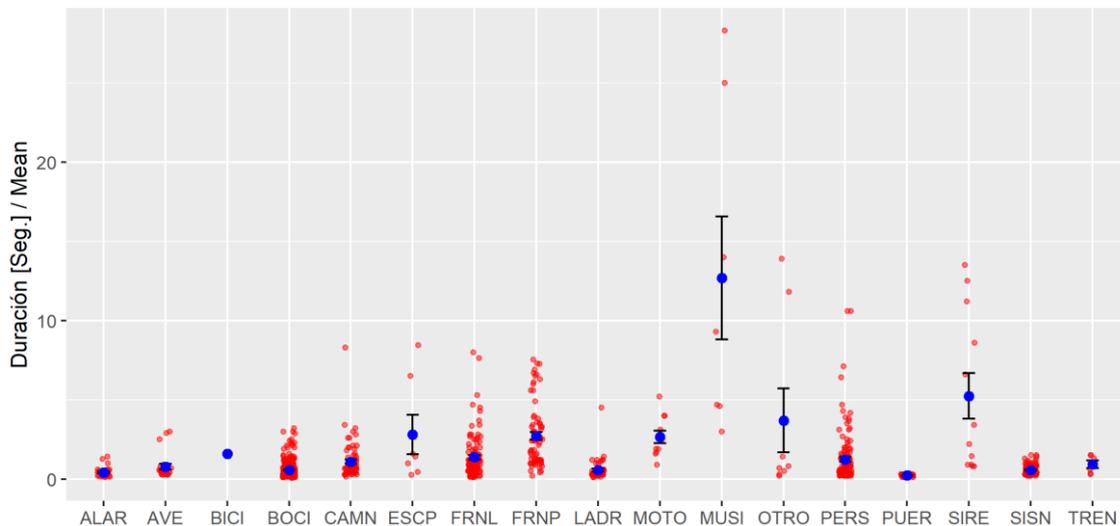


Fig. 4 – Duración (Seg.) ± error estándar de cada clase de evento (azul) en conjunto a los resultados individuales (rojo).

A pesar de su baja frecuencia de aparición y de su escasa distinción debido a su nivel, los eventos sonoros correspondientes a música en vehículos y en la vía pública (MUSI), son por lejos los de mayor duración. Estos promedian los 12.5 segundos, lo cual nos lleva a tenerlos en consideración a pesar de aquello. Las sirenas (SIRE) son otra de las categorías de eventos que se destacan en esta característica, exhibiendo una duración promedio de más de 5 segundos. Bastante por detrás, se observan los eventos correspondientes a las categorías ESCP, FRNP y MOTO con una duración promedio de aproximadamente unos 2.7 segundos. Las diez clases restantes, presentan una duración significativamente más baja, prácticamente todas por debajo del segundo.

Tal como se observa en las **Fig. 3** y **Fig. 4**, tanto los niveles como las duraciones de cada clase de evento poseen desviaciones bastante elevadas y en su mayoría no responden a distribuciones normales, con lo cual no fue posible obtener una parametrización de los eventos.

3.2. ESTIMACIÓN TEÓRICA DE LA INFLUENCIA DE LOS EVENTOS EN EL RUIDO DE TRÁNSITO

Luego de un análisis sobre los resultados de la base de datos, se realizó una estimación teórica de la influencia sobre el nivel de presión sonora continuo equivalente de cada clase de evento de manera independiente.

Considerando que es posible estimar el LAeq matemáticamente siempre que se tenga un registro temporal de los niveles de presión sonora (SPL) a lo largo de una medición, ver **Ec. (1)**, aplicamos la **Ec. (2)** a nuestro caso de estudio particular.

$$L_{Aeq,T} = 10 \log \left(\sum_{i=1}^N t_i 10^{SPL_{(A)i}/10} \right) \quad \text{Ec. (1)}$$

en donde

t_i : es la fracción del tiempo total de medición en que se registró el nivel SPL_i .

$SPL_{(A)i}$: es el nivel de presión sonora-i ponderado “A” registrado en el intervalo de tiempo t_i .

$$L_{Aeq,T} = 10 \log \left(t_{RT} \cdot 10^{SPL_{RDT(A)}/10} + t_{EA} \cdot 10^{SPL_{EA(A)}/10} \right) \quad \text{Ec. (2)}$$

en donde

$L_{Aeq,1h}$: es el nivel continuo equivalente ponderado “A” del ruido generado en la vía pública (ruido de tránsito + eventos anómalos) a lo largo de una hora (68 dBA)

t_{RT} : es la fracción del tiempo en que sólo hay presencia de RT.

t_{EA} : es la fracción del tiempo en que hay presencia de eventos anómalos.

$SPL_{RDT(A)}$: correspondientes al nivel de presión sonora promedio ponderado “A” del ruido de tránsito.

$SPL_{EA(A)}$: es el nivel de presión sonora promedio ponderado “A” de una clase de EA.

Esta última expresión, nos permite estimar el valor del $SPL_{RDT(A)}$ a partir de los datos de los niveles y duraciones de cada clase de evento por separado, los cuales fueron obtenidos en el análisis previo. En otras palabras, la **Ec. (2)** posibilita una estimación en el incremento del $L_{Aeq,1h}$ producido simplemente por la aparición de una única clase de evento de manera individual. Por eso mismo, en la **Tabla III** que se muestra a continuación, los cálculos se hacen de manera independiente por categoría, según la clasificación determinada en la **Tabla I**.

Se procedió a calcular el nivel de ruido de tránsito de la zona bajo estudio despejando el $SPL_{RDT(A)}$ de la **Ec. (2)** tal como se muestra en la **Ec. (3)**.

$$SPL_{RDT(A)} = 10 \log \left(\frac{10^{68dBA/10} - t_{EA} \cdot 10^{SPL_{EA(A)}/10}}{t_{RDT}} \right) \quad \text{Ec. (3)}$$

Conociendo el t_{EA} a partir de los datos de las duraciones de cada uno de los eventos y el tiempo total de la medición, calculamos el t_{RDT} . Notar que tanto t_{RDT} como t_{EA} son valores entre 0 y 1 ya que son fracciones del tiempo total de medición, y que la suma $t_{RDT} + t_{EA} = 1$.

En la **Tabla III** se presentan los resultados obtenidos al aplicar la **Ec. (3)** en donde se muestra el porcentaje de tiempo en el que se percibe cada clase de evento anómalo individualmente y su aporte al $L_{Aeq total}$. Dado que el $L_{Aeq total}$ es de 68 dBA, solo se tomaron en cuenta para el cálculo aquellos eventos individuales cuyo nivel supere los 68 dBA. Una vez calculado el SPL_{EA} con la **Ec. (1)**, se procede a calcular el SPL_{RDT} con la **Ec. (3)** y se realiza la diferencia entre el ruido de tránsito y el $L_{Aeq total}$ medido para ver la influencia de cada categoría de evento. Las categorías que no se presentan en la **Tabla III** tienen una influencia despreciable entre 0 y 0.1 dB. En términos totales, se obtiene una diferencia total de hasta 0.8 dBA.

Tabla III – Estimación del incremento en el L_{Aeq} por influencia de cada clase de evento.

	SISN	FRNL	FRNP	BOCI	SIRE
$L_{Aeq\ total}(dBA)$	68	68	68	68	68
$t_{EA}(\%)$	0.2%	0.2%	0.5%	0.5%	0.2%
$t_{RDT}(\%)$	99.8%	99.8%	99.5%	99.5%	99.8%
$SPL_{EA}(dBA)$	77.7	79.6	75.1	77.6	81.8
$SPL_{RDT}(dBA)$	67.9	67.9	67.9	67.8	67.8
$\Delta dB = L_{Aeq\ total} - SPL_{RDT}$	0.1	0.1	0.1	0.2	0.2

4. CONCLUSIONES

En este trabajo se desarrolló una metodología capaz de estudiar cómo influyen los eventos anómalos en una vía de la CABA. Al utilizar la misma, se concluye que los EA generados en una calle estándar de la CABA (residencial) la influencia de los mismos repercute en un 0.8 dBA (total) en el Leq (dBA) final con un porcentaje muy bajo de apariciones. Es de vital importancia mencionar, que tanto los niveles de presión sonora como la frecuencia de aparición obtenida de cada clase de evento, resultan de la recolección de audios en un único punto de la ciudad. Los resultados conseguidos son más representativos y comparables con aquellos puntos ubicados dentro de zonas residenciales con características semejantes a la del caso de estudio como las que se mencionan en la sección 2.1. Del mismo modo, la metodología aplicada podría replicarse en otros puntos más neurálgicos de la ciudad, en donde consideramos que estos registros pueden verse incrementados notablemente, tanto por la densidad de tránsito vehicular o por las características intrínsecas a las arterias de circulación lo cual modifica circunstancialmente el entorno (Ej. zona de bares y discotecas o puntos de alto tránsito donde el uso del claxon es habitual).

La variabilidad de los resultados en este estudio nos permitió entender que no fue posible parametrizar los eventos anómalos que transcurren en una vía. Esto se debe a que el SPL y las duraciones de las categorías analizadas presentaron mucha dispersión. A pesar de ser posible percibir auditivamente EA con niveles por debajo de RDT, estos no aportan al Leq (dBA) total. Por lo tanto, el contabilizar el caudal de EA en un intervalo de tiempo no es suficiente para contemplar su influencia en este indicador de forma directa. Por lo tanto, no todos los EA deben considerarse en un modelo para el estudio de su influencia en el nivel total de una vía. En este estudio, se propuso el uso de un umbral que exceda el ruido de tránsito sin EA a fin de obtener una muestra representativa para el estudio de la influencia de los EA.

REFERENCIAS

- Alías, F., Socoró, J. C., Description of anomalous noise event for reliable dynamic traffic noise mapping in real-life urban and suburban soundscapes. *Applied Sciences* 2017; 7:146.
- BM für Verkehr, Richtlinien für den Lärmschutz an Strassen (RLS-90), Bonn, 1990.
- Gobierno de la Ciudad de Buenos Aires, Control de la Contaminación Acústica en la Ciudad Autónoma de Buenos Aires (Ley N° 1540/04). Buenos Aires, 2004.
- Gobierno de la Ciudad de Buenos Aires, Decreto Reglamentario N° 740/GCBA/07, Buenos Aires, 2007.
- González, A. E., Gaja Diaz, E., Jorysz, A., Torres, G., Desarrollo de un modelo predictivo de ruido urbano adaptado a la realidad de Montevideo, *TecniAcústica*, Madrid, 2000.
- González, A. E., Modelación de ruido urbano: Innovando para reflejar la compleja realidad de una ciudad latinoamericana. *Seminario Internacional en Ruido Ambiental* 2008; 7-20.
- HMSO, Calculation of Road Traffic Noise (C.R.T.N.), Londres. United Kingdom Department of Environment and welsh Office Joint Publication, 1975.
- International Organization for Standardization, *Acoustics. Description, measurement and assessment of environmental noise. Part 2: determination of environmental noise levels (ISO 1996-2:1987)*, 2007.
- Orga, F., Alías, F., Alsina-Pagès, R. M., On the Impact of Anomalous Noise Events on Road Traffic Noise Mapping in Urban and Suburban Environments. *International Journal of Environmental Research and Public Health* 2017; 15, 13-28.
- Orga, F., Socoró, J. C., Alías, F., Alsina-Pagès, R. M., Anomalous noise events considerations for the computation of road traffic noise levels: The Dynamap`s Milan case study. *24th International Congress on Sound and Vibration*; London, 2017.
- SÉTRA, Road Noise Prediction. Noise Propagation Computation Method Including Meteorological Effects (NMPB-Routes-2008). Francia, 2009.
- SETRA-CERTULCPC-CSTB, Bruit des Infrastructures Routiers Methode de calcul incluant les effets météorologiques (NMPB-Routes-1996), Arrêté du 5 mai 1995 relatif au bruit, Journal Officiel du 10 mai 1995, Article 6, 1995.
- Stasi, A., Estudio comparativo entre modelos predictivos de ruido de tránsito vehicular y mediciones de validación en la Ciudad Autónoma de Buenos Aires, Caseros, BA: Universidad Nacional de Tres de Febrero; 2017.
- Torija, A. J., Ruiz, D. P., Ramos-Ridao, A., Required stabilization time, short-term variability and impulsiveness of the sound pressure level to characterize the temporal composition of urban scapes. *Applied Acoustics* 2011; 72: 89-99.

REDES DE BRAGG COMO SENSOR DE EMISSÃO ACÚSTICA PARA MONITORAMENTO DE DANO EM MATERIAIS COMPÓSITOS PRFV

da Silva, D.S., Groth, E.B., Walter, J.S., Lutckmeier, F., Zuglian, G. F., Jaques, R. C., de Lima, T.R.S. e Clarke, T.G.

Laboratório de Metalurgia Física, LAMEF, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, BRASIL

e-mail: saraiva.silva@ufrgs.br

RESUMO

Algumas características de materiais compósitos do tipo plástico reforçado com fibra de vidro (PRFV), como excelente resistência química e baixo peso específico, tornam sua utilização bastante atrativa para uma série de aplicações industriais, incluindo vasos de pressão e tubulações. Entretanto, um grande obstáculo para a sua aplicação em componentes de maior criticidade operacional é a escassez de métodos de inspeção e monitoramento que permitam avaliar sua integridade estrutural de maneira confiável e eficiente. O objetivo desse trabalho é o desenvolvimento de um método de inspeção e monitoramento baseada na detecção de emissão acústica com sensores de fibra ótica do tipo rede de Bragg (FBG) para ser aplicado na detecção de falhas e degradação de componentes produzidos com materiais compósitos do tipo PRFV. Esse novo método apresenta vantagens frente aos métodos de emissão acústica convencionais como, por exemplo: não oferecem riscos de explosão em ambientes classificados; imunidade a campos eletromagnéticos; baixa atenuação do pulso de luz mesmo para longas distâncias; e capacidade de multiplexação. A primeira etapa do trabalho consistiu no desenvolvimento e construção dos sensores FBG. Posterior, foram realizadas avaliações quanto a resposta dos sensores para detecção de eventos acústicos que foram produzidos de forma controlada. Na etapa final, o método foi aplicado para monitoramento de dano de um segmento de tubo submetido à ciclos de carregamento em fadiga. Os dados dos sensores FBG foram adquiridos com uma taxa de aquisição de 100kHz. Os testes foram monitorados também com métodos convencionais de emissão acústica, permitindo o comparativo dos resultados obtidos. O método proposto provou-se viável e com grandes potencialidades, isto porque, foi possível através dos sensores FBG a detecção de eventos acústicos no material PRFV tanto de forma controlada como no ensaio dinâmico.

Palabras Clave: Material Compósito, PRFV, Monitoramento, Emissão Acústica, Redes de Bragg.

1. INTRODUÇÃO

O avanço tecnológico de novos materiais demanda a necessidade do desenvolvimento de técnicas de monitoramento e métodos de inspeção que possibilitem assegurar confiabilidade operacional para aplicações em estruturas e operações críticas. Dentre estes materiais, compósitos do tipo plástico reforçado com fibra de vidro (PRFV) ganham relativo destaque devido às suas propriedades que trazem como principais vantagens alta resistência química e baixo peso específico.

Dentre as técnicas e métodos de inspeção aplicados atualmente para o monitoramento de danos e degradação deste tipo de material, o monitoramento de emissões acústicas (EA)

apresenta-se como uma alternativa promissora. (Maggi, 2018). Em suma, a degradação do material é acompanhada de eventos que envolvem a liberação de energia e que por sua vez conduzem a emissões acústicas no material, ondas elásticas transitórias geradas pela rápida redistribuição de deformação dentro do material durante o carregamento. (Assarar, 2016).

Normas e códigos atuais determinam o uso de transdutores piezoelétricos (PZT) como sensores de emissão acústica. (ABNT, 2005). Entretanto, este tipo de sensor apresenta algumas desvantagens, como dificuldade de acoplamento e grande quantidade de cabos para aquisição do sinal, o que impõe um maior peso para a estrutura.

Como alternativa, sensores de redes de Bragg em fibra óptica (FBG) são possíveis de serem aplicados como sensores de EA. (Rajan et al, 2017). Este tipo de sensor é amplamente utilizado como sensor de deformação devido à sua rápida resposta e grande sensibilidade à tensão longitudinal. (Campanella et al, 2018). Estudos demonstram a capacidade de monitoramento de EA com FBG a partir do uso de sistemas de interrogação com alta taxa de aquisição. (Xia et al, 2015).

O uso de fibra óptica como sensor traz consigo grandes vantagens frente aos sensores convencionais, como, por exemplo: pequeno tamanho e peso; capacidade de multiplexação, ou seja, mais de um sensor em uma única fibra óptica; imunidade a ruídos eletromagnéticos; baixa atenuação do sinal, podendo este ser adquirido a quilômetros de distância do ponto de medição; e possibilidade de instalação em ambientes classificados, com risco de explosão. (Rajan, 2015; Allil, 2010; Gomez et al, 2017).

Este trabalho tem como objetivo o desenvolvimento de um método de inspeção e monitoramento baseado na detecção de emissões acústicas com sensores FBG para ser aplicado na detecção de falhas e degradação de componentes produzidos com materiais compósitos do tipo PRFV. Para isto, foram realizados diferentes testes para avaliação da resposta dos sensores FBG. Os ensaios foram conduzidos em diferentes etapas. A etapa inicial foi realizada através monitoramento de eventos acústicos produzidos de maneira controlada em um segmento de amostra de tubo compósito PRFV. Sensores piezoelétricos foram utilizados nesta etapa para comparar os resultados obtidos com as duas técnicas. Na etapa final o sensor FBG foi aplicado para o monitoramento de danos e degradação de um tubo PRFV submetido a um ensaio de carregamento em fadiga.

2. REDES DE BRAGG EM FIBRA ÓPTICA (FBG) COMO SENSOR DE EMISSÃO ACÚSTICA (EA)

As redes de Bragg em fibra óptica são fabricadas através de técnicas que podem ser basicamente divididas em duas categorias: técnicas interferométricas e técnicas não interferométricas, através da exposição periódica a radiação UV ao longo de uma fibra óptica. A técnica não interferométrica mais utilizada para a fabricação de redes de Bragg em fibra óptica é através do uso de máscaras de fases, um elemento óptico difrativo que modula espacialmente o feixe UV emitido por um laser. Esta técnica foi demonstrada pela primeira vez em 1993 por K. O. Hill. (Hill et al, 1993).

As redes de Bragg em fibra óptica podem ser descritas como uma modulação periódica do índice de refração no núcleo de uma fibra óptica. Esta modulação periódica é perpendicular ao eixo longitudinal da fibra e possui espaçamento constante entre cada período. O princípio de funcionamento deste sensor envolve o uso de um interrogador óptico, que é responsável por emitir um pulso de luz através da fibra óptica e também pela aquisição do sinal refletido. O pulso de luz emitido pelo interrogador interage com a rede de Bragg e é refletido na direção oposta. Esta reflexão é centrada em um comprimento de onda específico conhecido como comprimento de onda de Bragg (λ_b). (Rajan, 2015). O λ_b por sua vez é uma função do índice de refração efetivo da fibra óptica (n_{eff}) e do período da rede (Λ_b), como descrito na equação 1:

$$\lambda_b = 2 * n_{eff} * \Lambda_b \quad (1)$$

Os sinais obtidos pelos sensores FBG são relacionados a variação do período da rede de Bragg devido a tensões longitudinais ou variação de temperatura. Esta correlação da variação do comprimento de onda da Bragg com a variação da deformação e de temperatura é descrita pela equação 2:

$$\frac{\Delta\lambda}{\lambda_0} = (1 - p) * (\epsilon_m + \alpha_{sp} * \Delta T) + \alpha_\delta * \Delta T \quad (2)$$

Onde p é o coeficiente foto elástico (0.22), ϵ é a deformação, α_{sp} é o coeficiente de expansão térmica do material, α_δ é a variação do índice de refração da fibra e ΔT a variação de temperatura.

3. METODOLOGIA

A metodologia do trabalho é separada em três etapas distintas: desenvolvimento e fabricação das redes de Bragg; avaliação da resposta a eventos acústicos gerados de forma controlada; avaliação de desempenho em ensaios dinâmico.

3.1. DESENVOLVIMENTO E CONSTRUÇÃO DOS SENSORES FBG

Na etapa de desenvolvimento e construção dos sensores foi realizada a fabricação e o encapsulamento dos sensores FBG. A fabricação dos sensores é feita através da técnica de máscara de fases. O laser utilizado para gravação das redes de Bragg foi o Braggstar M, da empresa Coherent. O laser opera através de pulsos de energia que emitem radiação ultravioleta com comprimento de onda de 248 nm, sendo sua frequência de operação variável até 100 Hz.

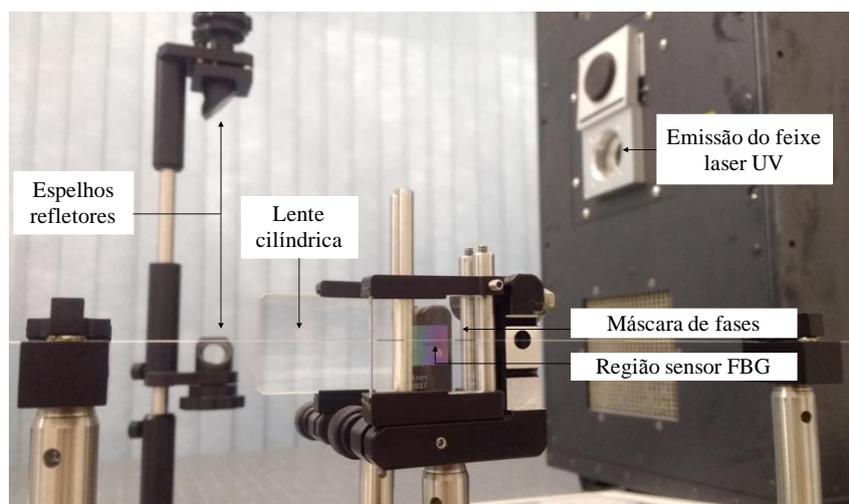
Nesta configuração de fabricação dos sensores uma região de aproximadamente 10 mm é descascada na fibra óptica, expondo o seu núcleo. Este será o comprimento ativo do sensor. A região é posicionada atrás da máscara de fases, um elemento óptico difrativo que possui sulcos gravados em uma das faces com espaçamento cuidadosamente

controlado. Este espaçamento é denominado período da rede de Bragg (Λ_{pm}), sendo que, cada máscara de fases possui Λ_{pm} específico, que dará origem a um sensor FBG distinto.

Neste trabalho a máscara de fases utilizada possui $\Lambda_{pm} = 1063$ nm que deu origem a um sensor FBG com $\lambda_b = 1550$ nm. A escolha da máscara de fases foi feita para possibilitar que o λ_b do sensor fabricado estivesse dentro da banda de medição do interrogador óptico que é de 1530 nm a 1558 nm.

Na Figura 1 é apresentada a fabricação dos sensores FBG. O laser emite pulsos de luz UV que irão incidir nos espelhos refletores. Estes espelhos direcionam o feixe de luz UV para uma lente cilíndrica posicionada a frente da máscara de fases que colima o feixe de luz e por consequência concentra sua energia. Por fim este feixe incide na máscara de fases e é difratado, atingindo o núcleo da fibra óptica posicionada logo atrás da máscara, dando origem ao sensor FBG.

Figura 1 – Fabricação dos sensores de redes de Bragg com a técnica de máscara de fases.



Devido a fragilidade durante o manuseio e instalação dos sensores FBG foi desenvolvida uma metodologia própria para encapsulamento dos sensores. Para tal o sensor FBG é primeiramente colado sob um substrato de poliamida, responsável por transferir as deformações da superfície para o sensor FBG. Após a colagem do sensor no substrato, é efetuado o seu encapsulamento com resina epóxi.

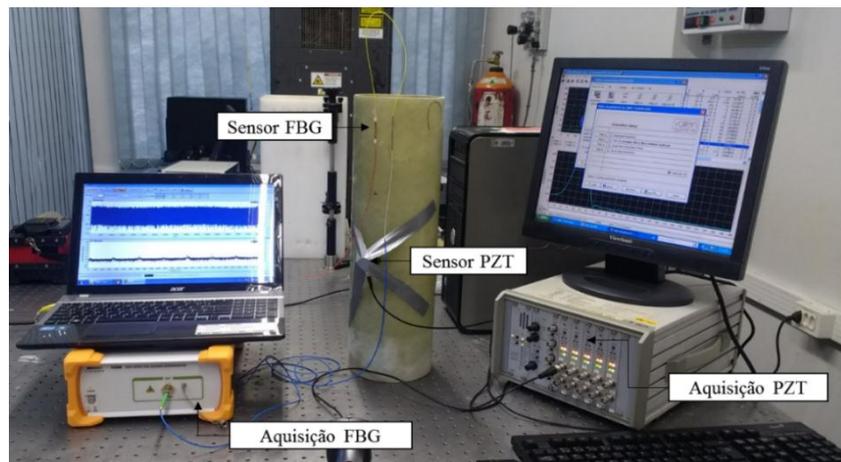
3.2. AVALIAÇÃO DA RESPOSTA A EVENTOS ACÚSTICOS GERADOS DE FORMA CONTROLADA

Nesta etapa foram realizados ensaios estáticos comparando a resposta dos sensores FBG com sensores piezoelétricos a eventos de emissão acústica gerados de forma controlada a partir da quebra de grafite. O interrogador utilizado para aquisição dos sinais de emissão acústica com sensores FBG foi o FI3200, da empresa Fiberpro, com capacidade de aquisição de até 100 kHz. Para aquisição dos sinais de emissão acústica com sensores

piezoelétricos o equipamento utilizado foi o AMSY-5, fabricante Vallen, e o sensor VS-30 sem pré-amplificação.

Na Figura 2 é apresentada a montagem do ensaio estático para comparativo das técnicas. Os sensores foram acoplados em um segmento de tubo PRFV. O sensor FBG foi aderido ao tubo com substrato cianoacrilato de cura rápida. Para adesão do sensor de emissão acústica é utilizado como acoplante vaselina sólida e a sua fixação feita através de fitas adesivas. O espaçamento entre cada sensor é de 300 mm.

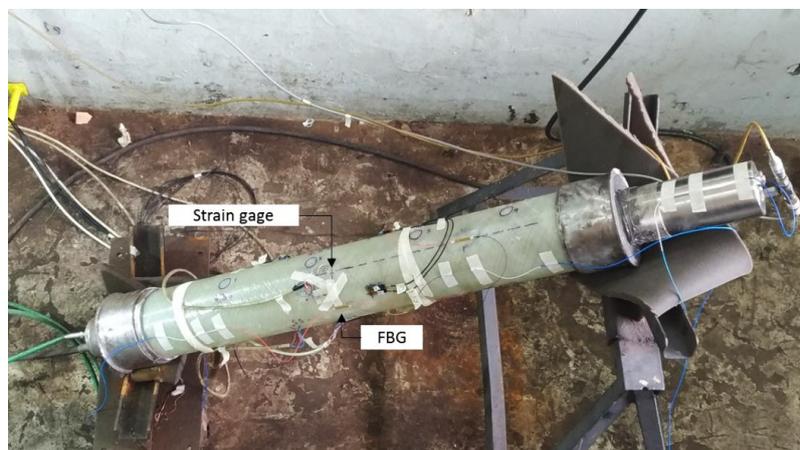
Figura 2 – Montagem do ensaio estático.



3.3. AVALIAÇÃO DE DESEMPENHO EM ENSAIOS DINÂMICOS

O desempenho dos sensores FBG em ensaios dinâmicos foi avaliado durante a aplicação de ciclos de carregamento em fadiga em um segmento de tubo PRFV. O ensaio foi conduzido em blocos de 5.000 ciclos. Na Figura 3 é apresentada a montagem do ensaio. Foi utilizado um sensor FBG posicionado no centro do tubo no sentido longitudinal. Para adesão do sensor foi utilizado substrato adesivo cianoacrilato de cura rápida. A aquisição dos sinais foi realizada com o equipamento FI3200.

Figura 3 – Montagem do ensaio dinâmico.



4. RESULTADOS

4.1 DESENVOLVIMENTO E CONSTRUÇÃO DOS SENSORES FBG

A metodologia aplicada para fabricação e encapsulamento dos sensores FBG se mostrou eficiente. Foi possível obter sensores com boa refletividade e robustez. Na Figura 4 é apresentado o espectro óptico do sensor FBG com $\lambda_b = 1050.60$ nm. Na Figura 5 é apresentado o sensor FBG após o encapsulamento.

Figura 4 – Espectro óptico sensor FBG.

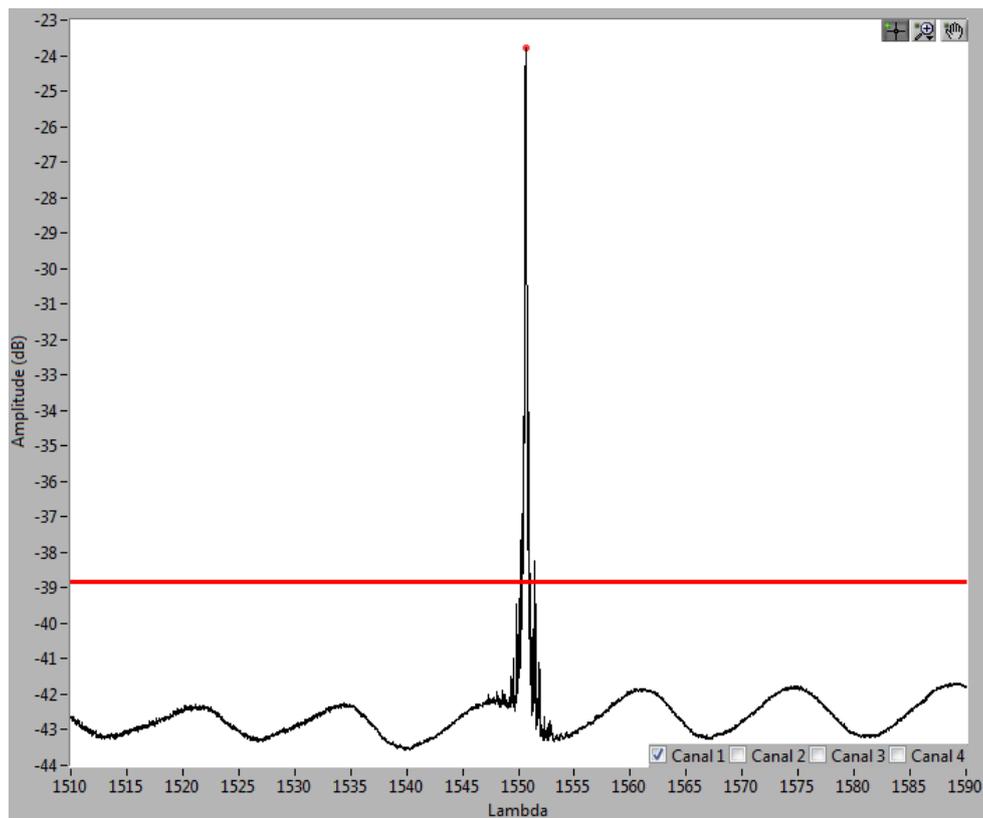
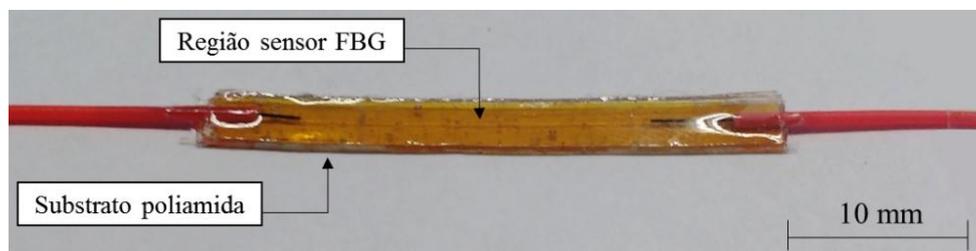


Figura 5 – Espectro óptico sensor FBG

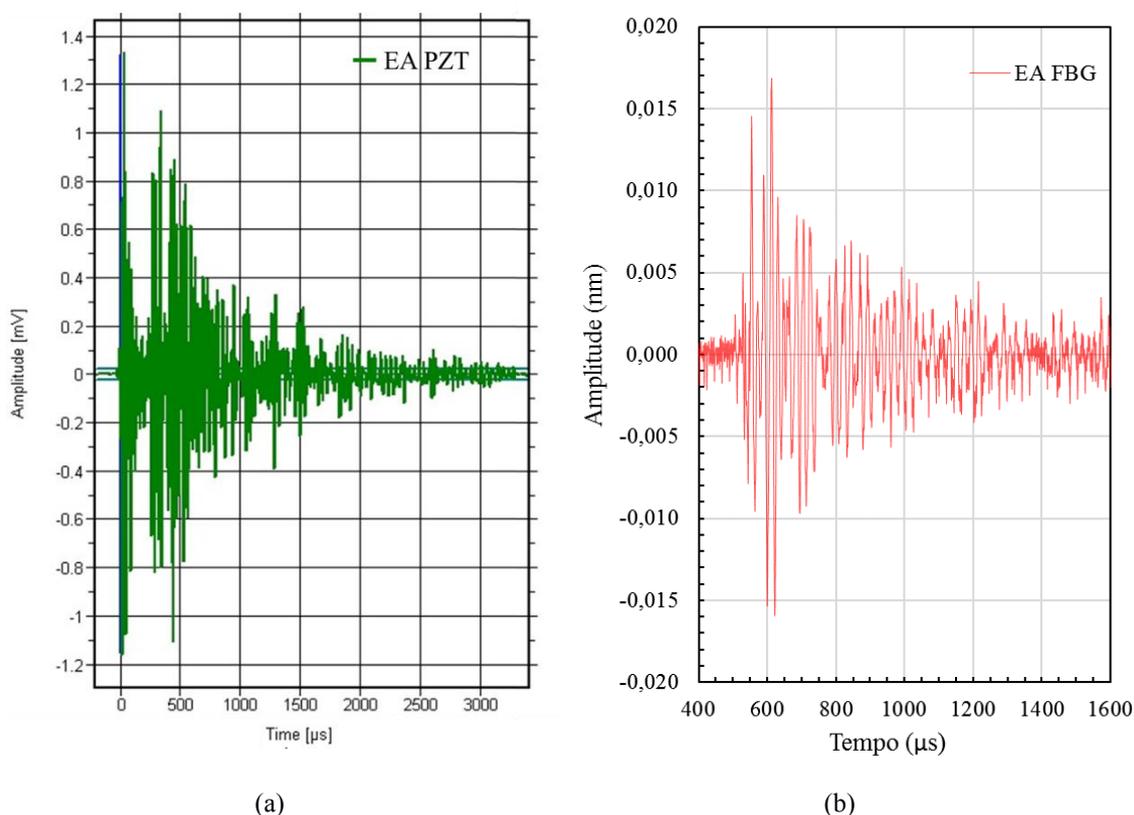


4.2 AVALIAÇÃO DE RESPOSTA A EVENTOS ACÚSTICOS DE FORMA CONTROLADA

Os resultados obtidos no ensaio com quebra de grafite para avaliação do desempenho de resposta dos sensores FBG em comparação com sensores PZT comerciais apresentaram resultados satisfatórios, uma vez que foi possível adquirir sinais de emissão acústica pela quebra de grafite em ambos sensores. Na Figura 7 (a) é apresentado a forma de onda adquirida pelo sensor PZT enquanto na Figura 7 (b) é apresentado o sinal obtido pelo sensor FBG do mesmo evento.

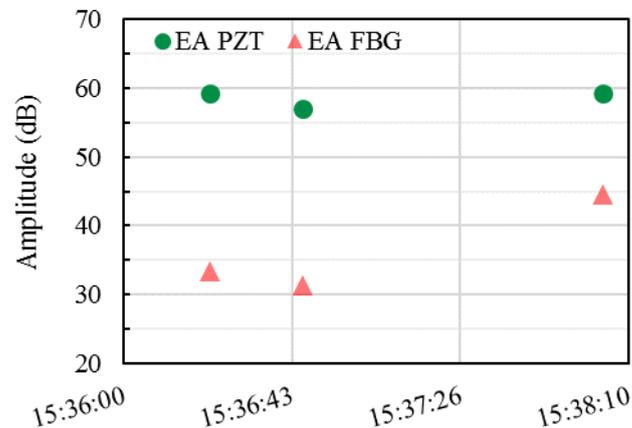
Na Figura 6 (b) observa-se uma relação entre a amplitude do sinal com relação ao ruído para o sensor FBG de aproximadamente 7,6x, sendo a amplitude máxima do sinal 0,01629 nm e o ruído próximo de 0,00214 nm.

Figura 6 – Evento acústico adquirido com sensor (a) PZT e (b) FBG.



O comparativo da amplitude dos sinais de cada sensor em dB para os eventos gerados é apresentado na Figura 7. Foram gerados três eventos com a quebra de grafite, todos na mesma posição. É verificado que a amplitude dos sinais adquiridos com sensor PZT é maior que o adquirido com sensores FBG. A amplitude dos sinais adquiridos pelo PZT foi mais constante quando comprado com os sensores FBG. Há uma variação na amplitude do sinal do sensor FBG acima de 10 dB no terceiro evento. Para o sensor PZT não houve variação significativa na amplitude dos sinais.

Figura 7 – Comparativo amplitude dos sinais adquiridos pelos sensores FBG e PZT em dB.

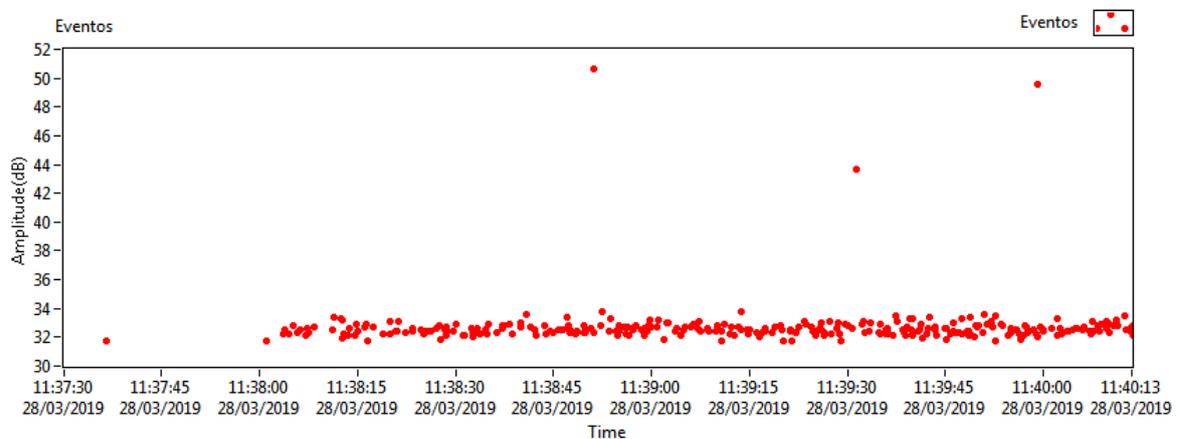


4.3 AVALIAÇÃO DE DESEMPENHO EM ENSAIOS DINÂMICOS

Os eventos de emissão acústica foram monitorados durante o ensaio de carregamento em fadiga. Neste trabalho será apresentado os resultados referentes ao início do bloco de 15.000 ciclos.

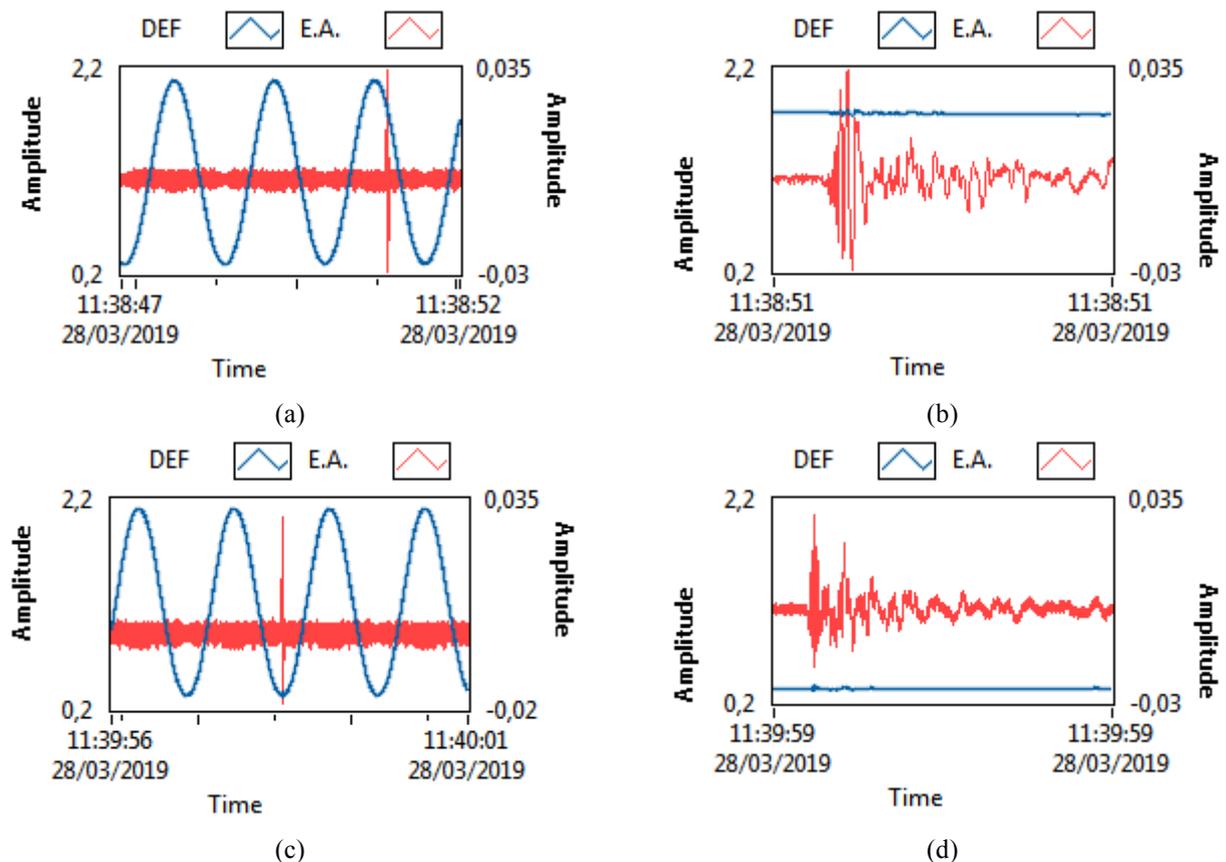
A Figura 8 apresenta a detecção de eventos de emissão acústica pelo sensor FBG.. Nesta imagem identifica-se três eventos com amplitude acima do *threshold*.

Figura 8 – Eventos de emissão acústica detectados durante ensaio de carregamento em fadiga



Nas Figuras 9 (a) e 10 (c) são apresentados os dados referentes a eventos detectados acima de 50 dB, nos instantes 11:38:51 e 11:39:59, enquanto nas Figura 9 (b) e 9 (d) são apresentados aumentos na região dos respectivos eventos.

Figura 10: (a) janela de detecção de eventos; (b) sinal de deformação e emissão acústica no evento detectado; (c) aumento na região do evento; (d) aumento na região do evento.



Os eventos de emissão acústica captados pelo sensor FBG apresentaram boa relação entre amplitude do sinal e o ruído, sendo a amplitude do sinal para o evento de maior magnitude equivalente a 0,035 nm.

Embora não seja possível correlacionar tais eventos com a degradação do material compósito PRFV é evidente que os sensores FBG obtiveram sinais que demonstram sua capacidade quanto a aquisição emissões acústicas do material, de modo que a investigação desta relação deve ser objeto de estudos mais aprofundados.

5. CONCLUSÃO

Neste trabalho foi apresentado o desenvolvimento de um método de inspeção em materiais compósitos do tipo PRFV baseado na detecção de emissões acústicas com sensores de fibra ótica do tipo redes de Bragg.

A técnica de fabricação dos sensores com o uso de máscara de fases se provou eficiente, possibilitando obter o sensor FBG com comprimento de onda λ_b dentro do esperado. Uma metodologia para encapsulamento do sensor FBG foi aplicada possibilitando ganho de resistência ao sensor durante seu manuseio.

Os sensores FBG detectaram eventos de emissão acústica gerados de forma controlada através da quebra de grafite com uma amplitude sinal de 0,0165 nm, 7,6x acima do ruído. Para efeito comparativo a média da amplitude do sinal do sensor PZT foi de 58 dB enquanto no sensor FBG a amplitude média foi de 36 dB.

No ensaio dinâmico os sensores FBG detectaram eventos de emissão acústica com amplitude de até 0,035 nm. Entretanto, não foi possível correlacionar tais eventos com qualquer tipo dano que comprovasse a degradação do material.

Os resultados obtidos neste trabalho se mostraram promissores e demonstraram de forma evidente a capacidade dos sensores FBG de detectar eventos de emissão acústica, tanto de forma controlada, quanto em ensaios dinâmicos, comprovando a potencialidade do método para monitoramento de danos em materiais compósitos do tipo PRFV.

REFERÊNCIAS

- ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 15269 – Ensaio não destrutivo – Monitoração contínua por emissão acústica – Procedimento. 2005.
- Allil R. C., “Sensores a fibra óptica com tecnologia FBG para medida de temperatura e alta tensão”, Tese (Doutorado) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, CPPE, Programa de Engenharia Elétrica. 209 f, 2010, Rio de Janeiro, Brasil.
- Assarar, M., Scida, D., Zouari, W., Saidane, E., Ayad, R. Acoustic emission characterization of damage in shorthemp-fiber-reinforced polypropylene composites. *Polymer composites* 2016. 1101-1112.
- Campanella, C., Cuccovillo, A., Campanella, C., Yurt, A., Passaro, V., Fibre bragg grating based strain sensors: review of technology and applications. *Sensors* 2018, 18, 3115;
- Gomez, J., A., Ozdagali, A., I., Moreu, F., Reference-free dynamic displacements of railroad bridges using low-cost sensors. *Journal of intelligent material systems and structures* 2017. v. I, n. 15.
- Hill, K., O., Malo B., Bilodeau F., Johnson D., C., Albert J., Bragg gratings fabricated in monomode photosensitive optical fiber by UV exposure through a phase mask, *Appl. Phys. Lett.* 1993. 62, 1035–1037.
- Maggi, A. Aplicação da técnica da emissão acústica em análise de dano em estruturas reforçadas com fibras. Monografia - Universidade Federal do Rio Grande do Sul. 25 f. 2018.
- Rajan G. “Optical Fiber Sensors Advanced Techniques and Applications”, Taylor & Francis Group, LLC, 2015, pág. 207.
- Rajan, G., Vinod, J., Moses, T., Prusty, B., Xi, J., Ballast breakage analysis using fbg acoustic emission measurement system. *Geotech Geol Eng* 2017; 35:1239–1247.
- Xia, M., Jiang, M., Sui, Q., Jia, L., Theoretical and experimental analysis of interaction from acoustic emission on fiber Bragg grating. *Optik* 2015. 126. 1150–1155.

EMISIÓN ACÚSTICA APLICADA AL MONITOREO DE PROCESOS DE PERFORACIÓN EN PROBETAS DE MATERIAL GEOLÓGICO

Ferrari, G.^a, Basgall A.^b, Gómez, M.^{a,b}

^a Grupo de Emisión Acústica, Facultad Regional Delta, Universidad Tecnológica Nacional, San Martín 1171, Campana, Buenos Aires, ARGENTINA.

^b Grupo de ondas elásticas – Proyecto ICES, Comisión Nacional de Energía Atómica, Av. Gral. Paz 1499, San Martín (1650), Buenos Aires, ARGENTINA.

e-mail: guicferrari@gmail.com

RESUMEN

La emisión acústica (EA) es conocida normalmente como una técnica de ensayos no destructivos (END) que ha sido aplicada con éxito en el control de recipientes a presión y de almacenamiento de hidrocarburos a presión atmosférica, estabilidad estructural de pértigas de PRFV para utilización en instalaciones eléctricas de media y alta tensión, control de fugas en válvulas y cañerías, control de descargas tipos corona en transformadores eléctricos, etc. En el presente trabajo se presentara la utilización de la EA como una técnica para el monitoreo indirecto de un proceso continuo como la perforación con broca (sin percusión) de probetas de material geológico. Las señales de EA generadas durante el proceso de perforación y corte varían según el material a ser cortado, el tipo de mecanismo de fractura, las condiciones de proceso como fuerza de avance y torque y la geometría del cortador entre otras variables. Este trabajo se basa en la comparación de las señales de EA generadas por la perforación de rocas sedimentaria con dos herramientas de diferente material (carburo de tungsteno y acero de alta aleación) y diferente número de filos (2 filos y 4 filos). Los parámetros de EA deben ser procesados mediante diferentes técnicas para identificar aquellos que brinden una descripción más detallada del proceso y utilizar su información para una posterior clasificación de las condiciones de perforación. Los resultados indican que la EA tiene la capacidad de precisar las variaciones en la dinámica del proceso introducidas por estos dos cortadores durante el perforado del mismo material sedimentario.

Palabras Clave: Emisión Acústica, monitoreo, Taladrado, Rocas.

1. INTRODUCCIÓN

La técnica de ensayos no destructivos de emisión acústica (EA) ha sido utilizada con éxito en el estudio de fallas que pueden afectar diferentes estructuras y componentes en diversas industrias. Esta técnica no solo permite detectar la degradación de un componente sino que eventualmente permite clasificar el tipo de evento que produce la onda elástica (clasificación del tipo de daño), adicionalmente esta técnica también permite posicionar espacialmente la fuente que la produce en función de los tiempos de vuelo de la onda propagada. Ejemplos clásicos de la aplicación de la EA son la detección y la localización de fracturas en componentes metálicos como recipientes a presión y de almacenamiento a presión atmosférica, análisis y clasificación de diferentes

tipos de procesos de rotura dentro de materiales tipo PRFV y PRFC, y muchas otras (Berthelot, J. et al, 1989), (Svoboda, V. et al, 2012), (Kishi, T. et al, 2000). Esta utilidad, ha generado la necesidad de establecer normas internacionales con el fin de estandarizar los procedimientos para el sistema de ensayos por EA que permiten la inspección de tanques, tuberías, análisis de pértigas de material compuesto, la detección y posicionamiento de descargas parciales en transformadores de potencia y otras tantas aplicaciones (IRAM NM 304:2012), (ASTM-STP1139, 1991), (IEEE Std. C57.127, 2007).

Avances en la técnica permiten no solo realizar ensayos puntuales de componentes sino que extienden el análisis y el monitoreo en el tiempo realizando controles on line por largos periodos de tiempo en elementos de gran importancia como puentes, tanques de amoníaco, turbinas de gas etc. Estos tipos de monitoreo son mucho más complejos de realizar debido a la instrumentación necesaria como a los análisis relacionados con la técnica.

En general los ejemplos anteriormente citados corresponden al monitoreo de señales temporalmente determinadas que pueden ser detectadas y asociadas a mecanismos de degradación que afectan a los materiales y a su condición estructural. Otro campo de aplicación de la EA, está relacionado con el análisis de procesos continuos que tienen asociadas señales de tipo estacionario o cuasi estacionarias. Estas señales que no están temporalmente determinadas, pueden ser obtenidas del monitoreo de procesos como deformación plástica, torneado, fresado, taladrado, erosión, abrasión y determinación de granulometría de flujo de partículas (Cook, A. et al, 2014) entre otros. Los algoritmos para analizar estos tipos de señales son diferentes y en general más sofisticados que los utilizados para señales no estacionarias. En estas condiciones, numerosos trabajos investigan la aplicación de la EA en el monitoreo de la condición de herramientas de corte y la terminación superficial de procesos de mecanizado de metales (Gómez M., 2012), (Everson C. et al, 1999) y materiales compuestos (Mascaro B. et al, 2009).

El proceso de remoción de material por perforación tiene la inherente consecuencia que el filo cortador de la herramienta se encuentra siempre inserta dentro del material y fuera del alcance del operador y por lo tanto los análisis de la condición de corte, estado de la herramienta y demás apreciaciones deben ser realizadas mediante la medición de variables indirectas asociadas al proceso de corte, como ser el torque, la fuerza de avance, la tasa de penetración, nivel de vibraciones, etc., (Bourgoyne A. Jr. et al, 1991). También está verificado que la variación de la geometría del cortador modifica la mecánica del proceso de corte (Rajabov V., 2012), y por lo tanto la EA que emite el proceso (Dornfeld D. et al, 1980).

En la literatura, se ha demostrado que la EA es muy eficiente en la detección del estado de la herramienta (Gómez M. et al, 2010), (Gómez M. et al, 2012) y también dando información relacionada con el proceso de corte, como por ejemplo la diferenciación de los estratos en función del proceso de perforación de materiales geológicos (Ferrari, G. et al, 2018).

En el presente trabajo, se realiza el monitoreo de la EA y la presión hidráulica de retención perteneciente al proceso de taladrado de material geológico mediante dos tipos diferentes de cortadores (de dos y cuatro filos). Los resultados muestran que varios parámetros de la EA pueden diferenciar ambos cortadores debido a la energía entregada al proceso y a la mecánica de corte involucrada en cada uno.

2. DESARROLLO EXPERIMENTAL

2.1. Sistema de Perforación

El sistema de perforación se encuentra equipado con un motor que proporciona la fuerza de torque de 4 HP de potencia y 4000 rpm nominal aplicada en la rotación. Adicionalmente, el equipo cuenta con una caja reductora y un variador de velocidad electrónico. La fuerza de avance es proporcionada por un sistema hidráulico basado en una central de 1 HP de potencia, que cuenta con regulación de presión y caudal en el sistema de empuje y retención respectivamente. Este equipo tiene un sistema intercambiable de cortadores e inyección de líquido de corte. Mediante un dispositivo agregado al cuerpo de la broca se logró implementar la medición directa de las señales de emisión acústica provenientes de la zona del corte, a partir de utilizar el cuerpo de la broca como guía de onda. Estas señales se digitalizan de manera simultánea con las presiones de empuje y retención del sistema de perforado para un monitoreo integral del proceso.

2.2. Cortadores ensayados

Los cortadores evaluados son diametralmente idénticos de 65 mm de diámetro, pero cuentan con diferencias geométricas en su diseño (ver Fig. 1), siendo una de las más relevantes la cantidad de filos y el material de estos.

El Cortador 1 (C1) es un cortador de dos filos compuesto de dos piezas. El cuerpo, que aloja al filo, y contiene agujeros de inyección de líquido y canales de descarga, está construido en acero SAE 4140 templado y revenido. El filo de corte está constituido por una placa de carburo de Tungsteno de 3.2 mm de espesor que forma un flanco de ataque de 0° respecto del material. Este se inserta y se pega al cuerpo de acero para conformar la unidad de corte completa.

El Cortador 2 (C2) tiene 4 filos de 10 mm de espesor cada uno con descarga y flanco de ataque 0° . Está realizado íntegramente (cuerpo y filos) en una pieza de acero SAE O2 de alto manganeso y apto para trabajar en frío. Este cortador fue templado y revenido, logrando otorgarle una dureza superior a 55 HRC.

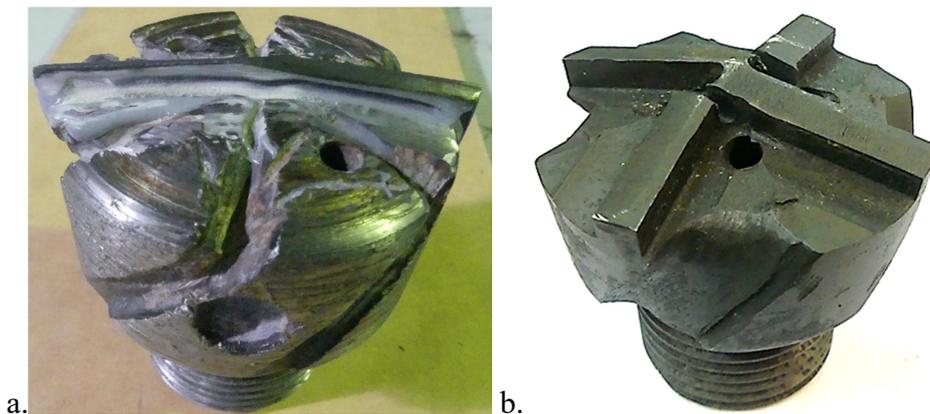


Fig. 1. a. Cortador C1 (dos filos de carburo de tungsteno). b. Cortador C2 (cuatro filos de acero SAE O2).

2.3. Probetas de material geológico.

Las probetas de material geológico están compuestas por dos estratos de material rocoso, cementadas mediante una mezcla de cemento, cal y arena en una proporción 0.8 : 0.2 : 3. Sobre cada probeta se realizan 4 perforaciones simétricamente distribuidas. Las probetas construidas son de geometría prismática de 320 mm x 320 mm x 400 mm de profundidad.

Los estratos de rocas están depositados en capas según se observa en la Fig. 2 y corresponden a rocas sedimentarias tipo caliza.

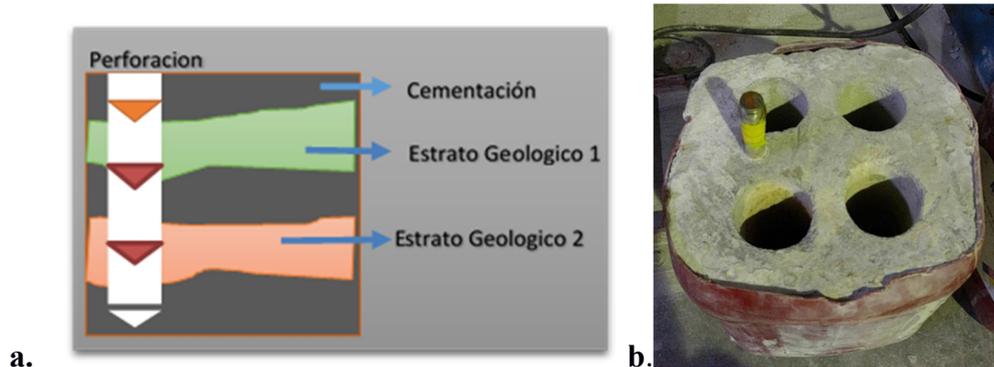


Fig. 2. a. Esquema de posicionamiento de los estratos analizados. b. Probeta con cuatro perforaciones.

2.4. Equipo de emisión acústica

El equipo de emisión acústica utilizado es uno comercial de 4 canales marca Physical Acoustics Corporation (PAC) modelo DISP-4 con capacidad adquisición de parámetros característicos de la EA y formas de onda. Las señales fueron tomadas con un sensor tipo banda ancha diferencial y amplificadas en 20 dB mediante un pre amplificador externo modelo 2/4/6 de la misma marca. El equipo se manejó en una PC con el software AEWin y los parámetros de EA registrados fueron: amplitud máxima, rms, Energía, Cuentas, Rise Time, frecuencia media, entre otros. También se tomaron las formas de onda de las señales del proceso de perforación y de manera paralela con la EA se digitalizaron las señales correspondientes a los sensores de presión hidráulica del sistema de empuje y de retención de la perforación.

Los parámetros que se utilizan para describir el ensayo son:

Presión de retención: expresada en [v], corresponde a la medición del sensor piezoeléctrico de presión de retención del sistema. Esta presión limita la velocidad de avance del sistema en durante la perforación. Según el estrato que se esté perforando sea más duro o más blando, esta presión varía, aumentando cuando el material taladrado es blando y disminuyendo cuando el material es más duro.

Amplitud: se define como la amplitud máxima que alcanza la señal de EA en el sensor una vez que cruza el umbral de detección cuya escala se define en dB, (ver Ec. 1).

$$dB = 20 \log \frac{Vs}{1\mu v} \quad \text{Ec. 1}$$

rms: Se define como el valor cuadrático medio de la señal (ver Ec. 2).

$$rms = \lim_{t \rightarrow \infty} \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^t [f(t)]^2 dt} \quad \text{Ec. 2}$$

Energía: Es el área medida bajo la envolvente de la señal rectificadora durante un hit.

2.5. Desarrollo del ensayo

Una vez montada la probeta en su posición, se procedió a realizar una serie de perforaciones con el cortador C1 y otra serie con el cortador C2. Los parámetros de proceso para ambos cortadores se establecieron en 28 rpm, un avance de 0.31 mm/s y 40 bar de presión de empuje. A su vez, se reguló el caudal de salida del cilindro de empuje para mantener una velocidad constante de avance. Una vez arrancada la perforación, la probeta fue taladrada hasta el final de la carrera de la perforadora, monitoreando en simultáneo, durante todo el ensayo, la EA producida por el proceso de taladrado, y las presiones de empuje y retención del sistema de hidráulico.

3. RESULTADOS

3.1. Caso broca C1 con doble filo de carburo de tungsteno

El análisis de la presión de retención del sistema permite determinar la dinámica de la broca y establecer cuándo se está taladrando el material cementicio de unión de los estratos respecto de la roca caliza. El cemento de unión es más blando que las capas geológicas de piedra caliza tal como se puede observar en la Fig. 3a, por lo tanto cuando el cortador llega al material duro, este se frena o retiene el avance produciendo un una reducción (alivio) en la presión de retención. Este efecto es producido por el sustrato y no por el sistema hidráulico. De manera que, la disminución de la presión de retención se asocia con el corte del material más duro, y los aumentos de la misma están asociados al proceso de perforación del material más blando.

Respecto de los parámetros de las señales de EA, la amplitud muestra un aumento durante el taladrado de las rocas calizas (ver Fig. 3b) y una disminución durante el taladrado del cemento. Los parámetros rms y energía de la EA exponen estas mismas variaciones, marcando también los momentos de cambio de interfaces entre cemento y caliza, debido a la inestabilidad que se produce durante la finalización del perforado de un sustrato de una dureza y pasaje de la broca al siguiente material con diferentes propiedades mecánicas (ver Fig. 3 c y d).

3.2 Caso broca C2 con cuatro filos de acero SAE O2

Los valores de presión de retención del sistema disminuyen a valores mínimos en los momentos en que la broca taladra la capa de caliza (ver Fig. 3a). Esto indica que esta roca ejerce una importante retención al avance, situación que puede atribuirse a la cantidad aumentada de filos y al espesor de los mismos en comparación al cortador C1. De manera general, los valores máximos de amplitud, rms y energía son inferiores respecto a la broca de dos filos lo que supondría que este cortador es más “silencioso” durante el proceso de corte. Otra característica importante, es que el comportamiento de estos parámetros de EA es inverso respecto del cortador de dos filos, (ver Fig. 3 b, c, d). Cuando el cortador C2 de 4 filos ingresa al material duro (piedra caliza) la emisión acústica disminuye y cuando este cortador perfora el material de cementación, la EA aumenta. Muchas de estas variaciones en la mecánica de corte pueden ser atribuidas a la geometría propia de los cortadores, donde el cortador C1 trabaja ejerciendo alta presión en una sección reducida de corte y fractura la roca por movimiento de corte y cincelado mientras que el cortador C2 que posee mayor cantidad de filos de mayor área tiene una menor penetración, ya que se distribuye la fuerza de corte en una superficie más grande, reduciendo el efecto de cincelado y aumentando el proceso de fricción y erosión.

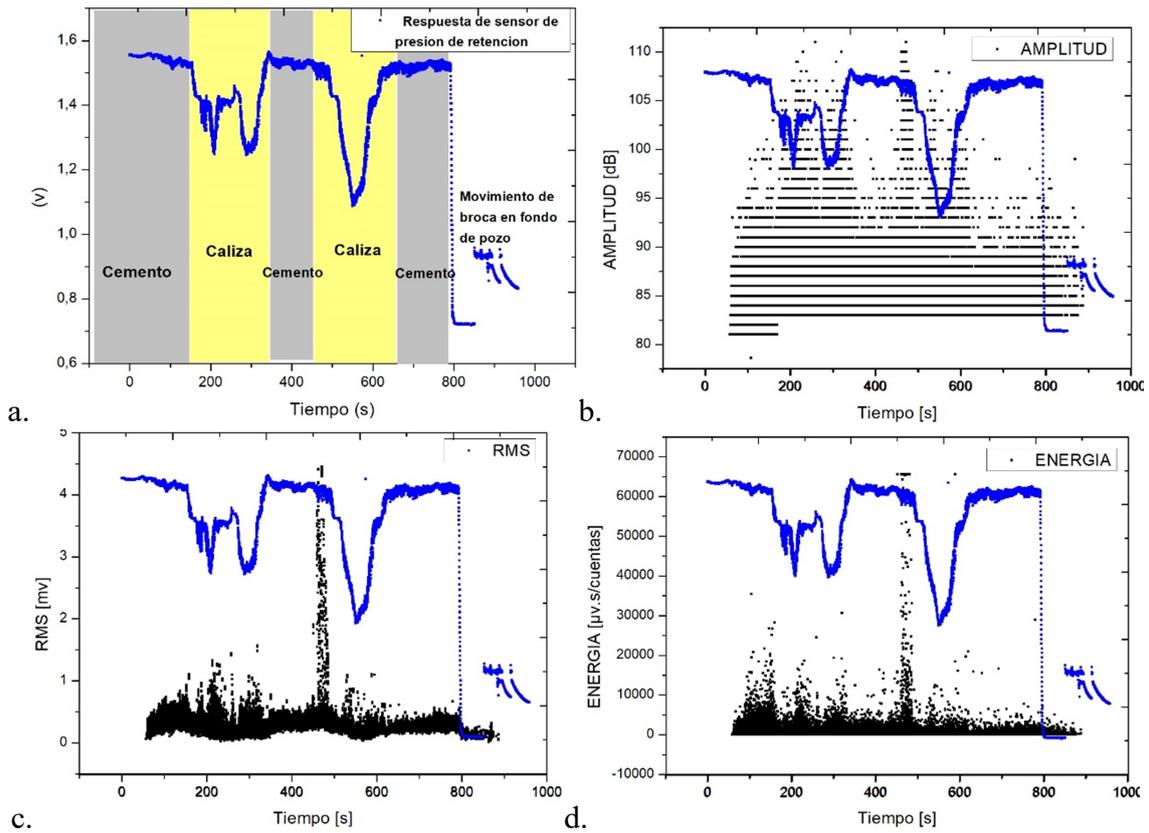


Fig. 3. Parámetros Broca C1 a. Presión de retención. b. Amplitud EA. c. rms EA. d. Energía EA.

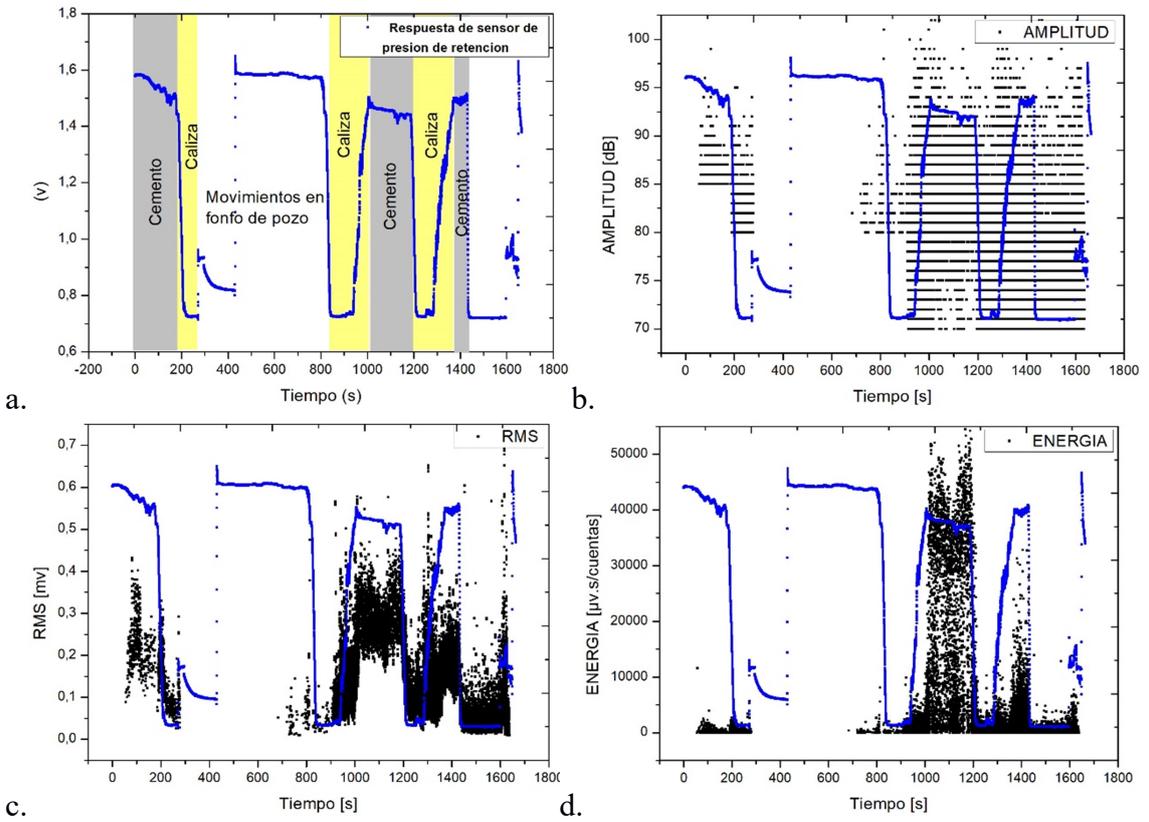


Fig. 3. Parámetros Broca C2 a. Presión de retención. b. Amplitud EA. c. rms EA. d. Energía EA.

4. CONCLUSIONES

La técnica de emisión acústica permite monitorear un proceso de taladrado mostrando variaciones en la dinámica del proceso de corte a medida que la broca atraviesa sustratos con diferentes propiedades mecánicas. Los parámetros de amplitud, rms y energía pueden ser indicadores útiles para caracterizar dicho proceso. A su vez, marcan claras diferencias entre cortadores con diferente geometría y sistemas de corte, lo que permite eventualmente utilizar esta técnica como control indirecto del proceso de perforación en la presente escala.

REFERENCIAS

- ASTM - STP 1139, *Acoustic Emission testing of aerial devices and associated equipment used in the utility industries*, 1991.
- Berthelot J., Rhazi J., *Acoustic emission in carbon fiber composites*, *Composites Science and Technology*, Vol. 37, 411-428, 1989.
- Bourgoynne A. Jr. et al, *Applied drilling engineering*, Society of petroleum engineers, 1991.
- Cook A., Collura S., Dumont M., Urbank T., *Continuous monitoring of powder size distribution using high temperature ATEX acoustic emission sensors*, 31 Conference of the European Working Group on Acoustic Emission, 2014.
- Dornfeld D. and Kannatey Asibu E., “Acoustic emission during orthogonal metal cutting”, *Int. J. Mech. Sci.* 1980; 22: 285-296.
- Everson C. E. and Cheraghi S H.. The application of acoustic emission for precision drilling process monitoring. *Int. J. Mach. Tools Manufacture* 1999; 39: 371-387.
- Ferrari G., Basgall A., Gómez M., *Caracterización de las etapas del perforado de probetas multicapas de geomateriales por análisis de la emisión acústica generada durante el proceso de taladrado*, E-ICES 13, Neuquén, 20
- Gómez M. P., *Estudio de las señales de EA generadas en el proceso de corte de metales. Aplicaciones a procesos de taladrado.* Tesis de Doctorado, UNSAM . (2012)
- Gómez M.P., Hey A.M., D’Attelis C.E. and Ruzzante J.E., Assessment of cutting tool condition by acoustic emission, *Procedia Materials Science* 2012; 1:321–328.
- Gómez M.P, Hey A.M., Ruzzante J.E. and D’Attellis C.E., “Tool wear evaluation in drilling by acoustic emission”, *Physics Procedia* 2010; 3:819–825.
- IEEE Power Engineering Society Std. C57.127 2007, *IEEE Guide for the determination and location of acoustic emission partial discharges in Oil-immersed power transformers and reactors*, 2007.
- IRAM NM 304:2012, (2012). Ensayos no destructivos - Ensayos de cilindros de acero sin costura por emisión acústica. *Norma Mercosur*.
- Kishi T., Ohtsu M., Yuyama S., *Acoustic Emission – Beyond the Millennium*, Elsevier 2000.
- Mascaro B., Gibiat V., Bernadou M., Esquerre Y., *Acoustic Emission of the drilling of Carbon/Epoxy Composites*, *Forum Acusticum* (2005).
- Rajabov V., *The effects of back rake and side rake angles on mechanical specific energy of single PDC cutters with selected rocks at varying depth of cuts and confining pressures*” IADC/SPE Drilling conference and exhibition (2012).
- Svoboda V., Zemlicka F., *Continuous monitoring of storage tank by emission method*, 30th European Conference on Acoustic Emission Testing & 7th International conference on Acoustic emission. University of Granada, 2012.

ANÁLISIS DE INCERTIDUMBRE PRODUCIDA POR EL CAUDAL VEHICULAR MEDIANTE EL USO DEL MÉTODO DE CÁLCULO NMPB-ROUTES-96

Galimberti J.^a, Ruffa F.^a, Stasi A.^a

^aGrupo de Investigación en Ruido Ambiental, Departamento de Ciencia y Tecnología, Universidad Nacional de Tres de Febrero, ARGENTINA

e-mail: juliangalimberti@gmail.com

RESUMEN

La presente investigación describe el desarrollo de una metodología para analizar la incertidumbre producida por el conteo del caudal vehicular (utilizados por los modelos de predicción de ruido de tránsito), para el cálculo de niveles acústicos mediante softwares de simulación. A partir del mapa de ruido de la Ciudad Autónoma de Buenos Aires (CABA) elaborado por la Agencia de Protección Ambiental (APrA) desde el año 2014, se detectaron ciertos puntos donde las diferencias entre el nivel medido y el obtenido en la simulación se encuentran entre 3 y 6 dB. El objetivo principal de esta investigación es estudiar, a partir de la incertidumbre generada por medio del conteo del aforo vehicular, el error en aquellos puntos con mayor diferencia entre los resultados del método predictivo para el ruido de tránsito rodado NMPB-Rutes-96 y las mediciones in situ del nivel de presión sonora continuo equivalente (utilizadas para la validación del modelo acústico). Para ello, y tomando como referencia los estudios utilizados en las ciudades de Providencia y Antofagasta, Chile, se desarrolló una nueva metodología, la cual, releva el caudal de tránsito diferenciando entre livianos (L) y pesados (P) a fin de realizar tres simulaciones en el software CadnaA alternando las cantidades de automotores L y P. Para ello, se consideró lo contabilizado manualmente y lo obtenido del modelo vehicular estadístico y se estudiaron las diferencias con los resultados arrojados por las mediciones in-situ. De esta manera, se concluye si la variable “caudal” genera mayores diferencias en los niveles de presión sonora obtenidos en el mapa de ruido de la CABA. Se presenta la metodología con los resultados parciales de un caso piloto, para luego ser extendido el análisis a una muestra mayor.

Palabras Clave: Ruido ambiental, Contaminación acústica, Mapa de ruido

1. INTRODUCCIÓN

La contaminación sonora es considerada como una de las principales problemáticas ambientales a nivel mundial (European Commission Environment DG, 2006). Esta situación, afecta tanto a países desarrollados como en vías de desarrollo, afectando especialmente a los grandes centros urbanos (Agency European Environment, 2009, 2016; J. Pacheco et al, 2009). En el caso de Argentina, la Ciudad Autónoma de Buenos Aires y el Gran Buenos Aires no son excepciones. En estos últimos años, se ha comenzado a tomar medidas tendientes a diagnosticar y mitigar los niveles a los cuales está expuesta la población (R. D. Ottobre et al, 2014).

Entre las herramientas de diagnóstico utilizadas, se encuentran los denominados mapas de ruido, que representan los niveles sonoros generados en una zona determinada de forma gráfica o numérica durante un periodo de un año. Mediante los resultados que se obtienen de los mapas de ruido, los entes reguladores generan planes de acción a fin

de mitigar la contaminación acústica en las zonas afectadas. En su origen este diagnóstico era realizado por medio de mediciones in situ interpolando los resultados de acuerdo con la distancia elegida entre puntos evaluados (Haedo, A., et al 1973). En la actualidad se grafican mediante programas de predicción acústica, permitiendo así, agilizar tiempos y reducir costos de grandes campañas de medición por todo el territorio.

A partir del mapa de ruido de la Ciudad Autónoma de Buenos Aires (CABA) elaborado por la Agencia de Protección Ambiental (APrA) desde 2014, se detectan ciertos puntos donde la diferencia entre el nivel medido y el nivel obtenido de la simulación se encuentra entre 3 y 6 dB. Esta situación impulsa una investigación que estudia cuál de los modelos de predicción de tránsito rodado (NMPB-96, NMPB-2008, RLS-90 y CRTN) se podría ajustar mejor a las mediciones in situ realizadas por la APrA usadas para validar el mapa de ruido (Stasi, A., 2017). Entre sus conclusiones, afirma que la actualización, NMPB-Routes-08, del modelo de cálculo NMPB-Routes-96, establecido actualmente por el Decreto N° 740-07 (Gob, de la Ciudad de Buenos Aires, 2007) reglamentario de la Ley N° 1.540-04 (Gob, de la Ciudad de Buenos Aires, 2004) produce menor error en la mayoría de los puntos de medición. Como línea futura, el autor propone seguir indagando en la utilización de otros modelos de cálculo extranjeros o más aún, la creación de un modelo local. Además, sugiere estudiar el error asociado a las variables de entrada, principalmente los datos correspondientes al modelo vehicular.

En el año 2018, en Buenos Aires, Arg., se conforma el Grupo de Investigación de Ruido Ambiental (G.I.R.A) integrado por docentes, investigadores, graduados y alumnos de la carrera Ingeniería de Sonido dictada en la Universidad Nacional de Tres de Febrero (UNTREF). El objetivo principal del G.I.R.A es crear un modelo de cálculo para softwares de predicción acústica diseñado específicamente para la Ciudad Autónoma de Buenos Aires. De este objetivo parten ciertos objetivos específicos, destinados al análisis de las variables de entrada de los modelos de cálculo. En este marco, se encuentra incluido este estudio, que a su vez formará parte de la tesis de grado del autor. La presente investigación describe el desarrollo de una metodología para analizar la incertidumbre producida por el conteo del caudal vehicular (utilizados por los modelos de predicción de ruido de tránsito), para el cálculo de niveles acústicos mediante softwares de simulación.

Puntualmente, se analizan ciertos puntos de validación del mapa de ruido de la Ciudad Autónoma de Buenos Aires (CABA), que no han sido tenidos en cuenta, dada la dimensión de la diferencia en la relación simulación-medición. Se seleccionan criteriosamente ciertos puntos y se releva el caudal de tránsito diferenciando entre livianos (L) y pesados (P) a fin de realizar tres simulaciones en el software CadnaA alternando las cantidades de automotores L y P. Para ello, se considera lo contabilizado manualmente y lo obtenido del modelo vehicular estadístico aplicado para la generación del mapa de ruido de la CABA. A partir de esto, se estudiarán las diferencias con los resultados arrojados por las mediciones in-situ. Se presenta la metodología con los resultados parciales de un caso piloto, para luego ser extendido el análisis a una muestra mayor.

2. METODOLOGÍA

Se detallan los métodos de obtención y procesamiento de la información necesarios con el fin de poder realizar el análisis que se plantea en esta investigación, ejemplificando con el punto “Avenida Santa Fe 1126”, correspondiente a la Comuna 1 de la CABA.

2.1 DEFINICIÓN DEL ÁREA DE TRABAJO

La presente investigación se realiza en la Ciudad Autónoma de Buenos Aires (CABA), Argentina. En particular, se toman puntos que fueron utilizados para la validación del mapa de ruido realizado por la APrA, pertenecientes a la Comuna 1.

2.2 RECOLECCIÓN DE DATOS

En el marco de la Ley 104 de acceso a la información pública se solicita a la Agencia de Protección Ambiental de la Ciudad Autónoma de Buenos Aires (APrA) la siguiente información de cada punto de la Comuna 1 donde se realizaron las mediciones in-situ para la validación del mapa de ruido:

- Nivel de presión sonora equivalente ponderado A en períodos de 5 minutos correspondientes al período diurno (7:00 a 22:00 hs) y nocturno establecidos en el decreto 740/2007 de la CABA (Gob, de la Ciudad de Buenos Aires, 2007) y a 2, 3, 4 o 5 días hábiles (o laborales) medidos por las estaciones de monitoreo de la APrA.
- Nivel de presión sonora equivalente diurno, L_{day} , calculado para el mapa de ruido de la CABA utilizando el método de cálculo francés NMPB-Routes-96.
- Aforo de tránsito liviano y pesado proveniente del modelo vehicular utilizado para la elaboración del mapa de ruido de la CABA.

Las mediciones de nivel de presión sonora fueron realizadas con estaciones de monitoreo distribuidas en cada Comuna. Debido a limitantes económicas y logísticas se realizaron las mediciones por partes, es decir, primero en algunas comunas y luego se desmontaron las estaciones de monitoreo para situarlas en las comunas restantes. Los micrófonos fueron instalados a una altura de $4m \pm 0,2 m$, y a una distancia mínima de 2 m de la fachada de la edificación.

2.3 CRITERIOS DE SELECCIÓN DE LOS PUNTOS

A partir de todos los puntos que fueron utilizados para la validación del mapa de ruido de la Comuna 1 se realiza una selección más fina basándose en los siguientes criterios:

1. Pertenecer a la Comuna 1.
2. Contar con información correspondiente al período diurno.
3. Situar, por lo menos, a 200 m de líneas ferroviarias, puertos y aeropuertos.
4. Diferir de la validación más de 3dB.
5. Contar con información correspondiente a 3 días laborales, martes a jueves.
6. No haber sufrido cambios de infraestructura que impacten en la calzada.
7. No haber sufrido cambios en la traza vehicular cercana.

En relación con el criterio 1, en esta investigación se seleccionan puntos pertenecientes a la Comuna 1 debido a que sus mediciones son las más actuales en el tiempo. Están comprendidas entre los meses de septiembre y noviembre de 2017. De esta forma, al haber pasado menos tiempo entre la medición de validación realizada por la APrA y el conteo de aforo vehicular llevado a cabo en este trabajo resulta menos probable que los puntos de la ciudad hayan sufrido cambios en su infraestructura.

Con respecto a la información del período diurno, se decide analizar solo ese período por cuestiones de seguridad a la hora de realizar el conteo manual de aforo.

En cuanto a la distancia mínima entre cada punto de análisis y líneas ferroviarias, puertos y aeropuertos, la presente investigación se centra en el estudio del modelo de ruido de tránsito automotor NMPB-ROUTES-96, por esa razón se intenta evitar la influencia de ruidos generados por líneas ferroviarias, puertos y aeropuertos. Si se analizara la diferencia de validación en un punto donde la fuente de ruido predominante no fueran los automóviles se podría incurrir en conclusiones erradas, ya que todo el análisis se sustenta en considerar al aforo vehicular como principal y único generador del ruido urbano. Se define 200 m como la distancia mínima entre cada punto en cuestión y las posibles fuentes sonoras ya descritas, debido a que a partir de esa distancia entre fuente y receptor el aporte de la fuente es prácticamente despreciable.

Considerando el cuarto criterio, se toma la información de cada punto de validación correspondiente a la Comuna 1 y se analizan las diferencias de validación que presenta cada caso correspondiente al L_{day} . Una vez analizadas las diferencias de validación se seleccionan aquellas que presenten mayor diferencia (siempre mayor a 3 dB). Se considera 3 dB ya que para la validación del mapa de ruido de la CABA se utilizó como valor límite 4 dB. Se busca analizar si algún punto dentro del entorno cercano del límite de validación podría ser considerado validado cuando no lo es y a la inversa, teniendo en cuenta el aforo medio de forma manual en este trabajo.

Por otro lado, se decide que se debe contar con información correspondiente a 3 días hábiles laborales, martes a jueves. Los datos utilizados corresponden al nivel de presión sonora equivalente ponderado A en períodos de 5 minutos de un total de 5 a 9 días consecutivos, según cada punto. Esta información se utiliza para comparar la metodología de conteo manual de aforo vehicular utilizada para la elaboración del mapa de ruido de Antofagasta, Chile (Comisión Nacional del Medio Ambiente de Chile, 2008) y otra metodología que se propondrá más adelante en esta tesis.

Como solución de compromiso en relación con los datos disponibles se podría considerar utilizar la menor cantidad de días consecutivos medidos en cada punto. Esta cantidad resulta ser 5, pero si se observan las cantidades mínimas de días hábiles (laborales) comprendidos entre martes y jueves se reduce a solo 2 días completos de medición en algunos casos particulares. Se eligen los puntos que cuenten por lo menos con 3 jornadas consecutivas de medición y que además correspondan a martes, miércoles y jueves. Esta elección se debe a que usualmente el aforo vehicular en esos días suele ser más representativo que los lunes o viernes.

La consideración de contar solo con 3 días se fundamenta con el estudio realizado por A. Stasi en 2017, donde se realiza un estudio del desvío del promedio energético acumulado en 8 puntos de la Comuna 4 de la CABA donde la APrA relevó información por hasta 38 días consecutivos. Por lo tanto, mediante el análisis del nivel sonoro promedio energético acumulado buscó determinar una cantidad fija de días que sea representativa. En todos los casos analizados durante el período diurno halló que las variaciones no superan el valor de 0,9 dB. Se toma como solución de compromiso utilizar

3 días acumulados, ya que la diferencia entre tomar tres días y nueve días es, para todos los puntos, notablemente inferior a 0,9 dB. Se toma como valor de Nivel Sonoro Continuo Equivalente ponderado “A” (L_{eqA}), al promedio energético acumulado de tres días continuos (martes, jueves y viernes). Este es obtenido integrando los resultados cada 15 minutos durante el período diurno.

En cuanto a los cambios de infraestructura, si se realizara el conteo de aforo vehicular en un punto de la CABA donde se haya construido, por ejemplo, carriles exclusivos para colectivos (Metrobus), luego de haberse realizado la validación del mapa de ruido se estaría incurriendo en un error. Ya que ese punto contaría con un aforo vehicular distinto al que se hubiera registrado al momento de realizarse la medición de validación. Por esa razón, se seleccionan aquellos puntos que no hayan sufrido cambios que pudiesen afectar significativamente el caudal vehicular promedio. Además, cambios realizados en calles muy cercanas a los puntos de análisis podrían afectar tanto cualitativa como cuantitativamente el aforo vehicular. Se decide también analizar si desde octubre de 2017 al momento de realizarse el conteo manual de aforo se llevaron a cabo obras de infraestructura que afecten o modifiquen la circulación de vehículos.

2.4 DESCRIPCIÓN DEL MÉTODO DE CONTEO MANUAL DE AFORO VEHICULAR

Se propone un criterio de determinación de franjas horarias para realizar el conteo manual de aforo vehicular. Luego, se lo valida con el método utilizado en el Estudio de levantamiento de información de entrada de modelo de predicción de ruido y aplicación en caso piloto (Comisión Nacional del Medio Ambiente de Chile, 2008) utilizado por el gobierno de Chile para la realización del Mapa de Ruido de las comunas de Providencia y Antofagasta. Se comparan los aforos determinados por cada método.

2.4.1 Criterio propuesto de determinación de franjas horarias para conteo manual de aforo vehicular.

Se analizan los niveles de presión sonora equivalente integrados cada 5, 15, 30 y 60 min, medidos por las estaciones de monitoreo de la APrA correspondientes a días hábiles. En la Fig. 1 se presentan los L_{eqA} , correspondientes a cada tiempo de integración de un punto de la CABA en particular, Avenida Santa Fe 1126.

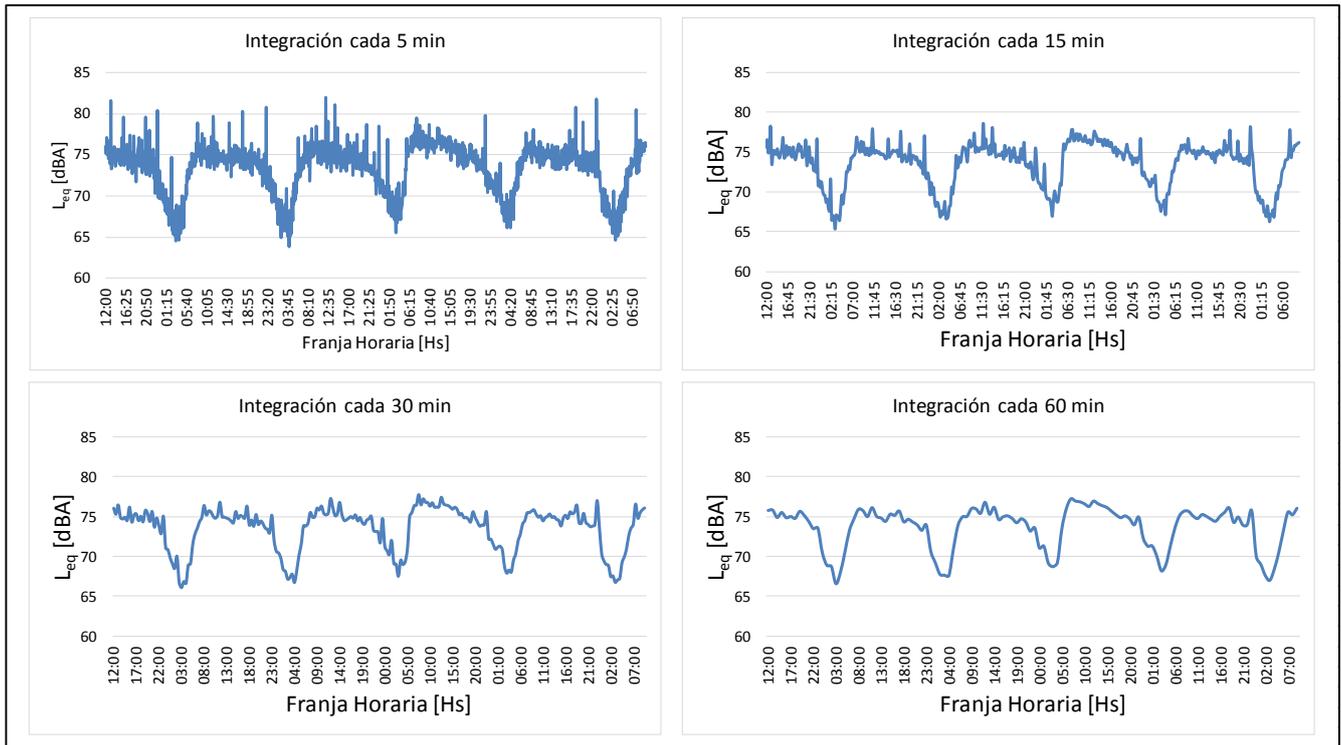


Fig. 1: Distribución del L_{eqA} a lo largo de 5 días hábiles de medición de Avenida Santa Fe 1126.

Se puede observar en la Fig. 1 que el perfil de los gráficos es similar al modelo típico de un perfil de demanda de una avenida de la CABA con gran aforo vehicular presentado en la Fig. 2 (Proyecto de contracarriles de Avenida Santa Fe).



Fig. 2: Perfil de demanda típico de una avenida con gran aforo de la CABA.

Siendo conocida la proporcionalidad directa entre las variables “Aforo vehicular” y “ L_{eqA} ” sumado a la similitud entre la morfología de ambas gráficas se propone la siguiente consideración: Si se encontrara una franja horaria donde su L_{eqA} fuera coincidente con el L_{day} se podría extrapolar esta relación y realizar el conteo de aforo vehicular en esa misma franja horaria y considerar el caudal hallado como el promedio del total de vehículos del período diurno. La extensión de la franja es de 15 minutos, basándose en el trabajo titulado “Tiempos de estabilización del espectro del ruido de tránsito” presentado por Miyara et al en 2008. Luego, se determinan las franjas horarias

que cumplen con esta consideración. Gráficamente es posible visualizarlas en la Fig. 3, donde se ejemplifica el procedimiento para el punto Avenida Santa Fe 1126.

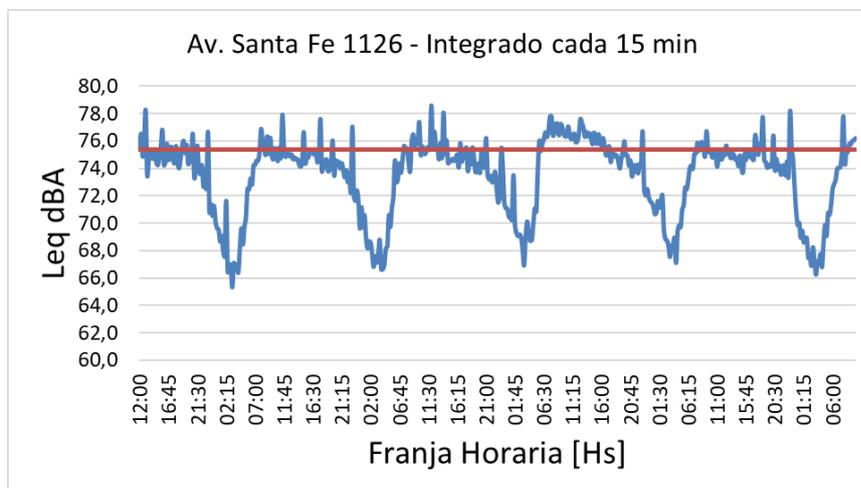


Fig. 3: Comparación del L_{eqA} a lo largo de 5 días hábiles de medición de Avenida Santa Fe 1126 y el L_{day} .

Se calculan las diferencias absolutas de cada L_{eqA} integrado cada 15 minutos con el L_{day} integrado durante todo el período diurno. Luego, se estudian las diferencias que se registran para cada caso. Al procesar la información medida durante más de un día es importante aclarar que cada franja horaria posee por lo menos cinco L_{eqA} distintos con sus respectivas diferencias absolutas, por eso se decide promediar las cinco diferencias halladas.

En la Fig. 4 se presentan las diferencias correspondientes a cada segmento de 15 minutos en orden creciente. De esta manera es posible definir los 3 horarios que presentan menor diferencia para realizar los conteos manuales de aforo vehicular.

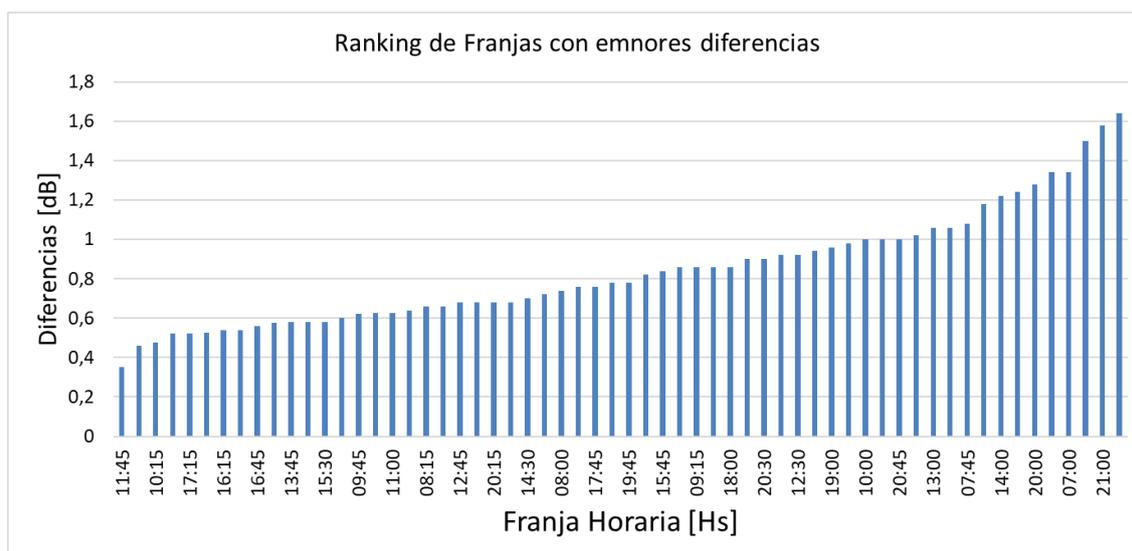


Fig. 4: Diferencias correspondientes a cada franja horario de 15 minutos.

Se observa que las diferencias para cada franja analizada, en el caso particular de Avenida Santa Fe 1126, están comprendidas entre 0,4 y 1,6 dB. Se decide, para este caso

piloto, realizar los conteos de aforo en las franjas indicadas en la Tabla I, junto a sus diferencias.

Tabla I: Franjas horarias de conteo de aforo vehicular, Avenida Santa Fe 1126.

Franja Horaria	Diferencia con L_{day} [dB]
De 11:45:00 a 12:00:00	0,4
De 17:00:00 a 17:15:00	0,5
De 10:15:00 a 10:30:00	0,5

2.4.2 Criterio propuesto para el conteo manual de aforo vehicular.

Se realiza el conteo para cada punto de estudio de la CABA en las tres franjas horarias de 15 minutos, correspondientes al período diurno, con menores diferencias analizadas previamente. Se requieren cuatro personas, de ahora en más colaboradores, para realizar cada conteo. Se sitúan dos colaboradores de cada lado de la calle. En ciertos casos, la calle posee más de un carril o doble sentido de circulación. En esos casos se reparten los carriles a ser contados por cada pareja de colaboradores. Las cantidades registradas por cada pareja se promedian y se suman con el promedio de las cantidades de la otra pareja de colaboradores. De esta manera, al realizar un conteo doble en cada carril y luego promediarlo se disminuyen los posibles errores de conteo que pueda introducir cada individuo.

El registro se lleva a cabo con una aplicación para celular de descarga gratuita desde la tienda de Android. El nombre de la aplicación es “Traffic Counter”, en la Fig. 5 se observa la pantalla principal de la aplicación utilizada.



Fig. 5: Aplicación utilizada para el conteo manual de aforo, “Traffic Counter”.

El conteo se realiza discriminando visualmente entre vehículos livianos y pesados, siendo livianos los de peso menor o igual a 3500 Kg (referencia). Los colectivos y camiones son considerados como tránsito pesado, el resto de los vehículos corresponden a tránsito liviano, a excepción de las bicicletas que no se tienen en cuenta en ningún registro. Luego de contarse los aforos en cada uno de los tres intervalos de 15 minutos hallados previamente se calcula el promedio lineal. En la Tabla II se ejemplifica lo mencionado para el punto piloto.

Tabla II: Franjas horarias de conteo de aforo vehicular, Avenida Santa Fe 1126.

Avenida Santa Fe 1126							
(1) AFORO - Manual 1				(2) AFORO - Manual 2			
Livianos	Pesados	Total	% Pesados	Livianos	Pesados	Total	% Pesados
1406	416	1822	22,8%	1374	350	1724	20,3%
(3) AFORO - Manual 3				(4) AFORO - Manual PROM			
Livianos	Pesados	Total	% Pesados	Livianos	Pesados	Total	% Pesados
1532	368	1900	19,4%	1437	378	1815	20,8%

En las secciones (1), (2) y (3) se presentan los resultados para cada período de medición, y en la sección (4) se calculan los promedios en las tres secciones previas. Los resultados obtenidos en la sección (4) son comparados para su validación con los valores obtenidos mediante el método de conteo manual utilizado para la prueba piloto de la elaboración del mapa de ruido de la Comuna de Antofagasta, Chile (Comisión Nacional del Medio Ambiente de Chile, 2008).

Resulta importante destacar que antes de cada conteo de aforo se verifica que las condiciones generales de circulación de la calle a medir y las más cercanas sean las cotidianas. Es decir, se verifica que las calles no estén cortadas por obras de construcción o por marchas, que no se encuentren vehículos detenidos interrumpiendo significativamente el flujo normal de vehículos. A su vez, se tiene en cuenta la condición climática del momento de la medición. En todo el momento se encontraba parcialmente nublado, aunque sin precipitaciones y con una temperatura promedio de 25 [°C] y humedad del 85% según el servicio meteorológico nacional. Las mediciones del punto “Avenida Santa Fe 1126” se realizaron el día Miércoles 12 de Junio. En la Fig. 6 se observan imágenes del conteo manual de aforo vehicular realizado.

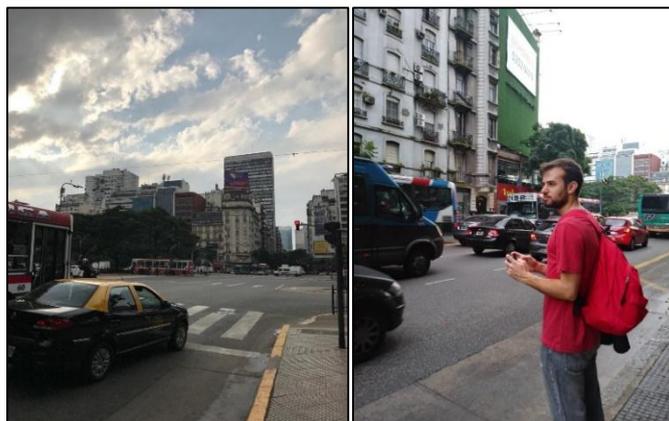


Fig. 6: Conteo manual de aforo en Av. Santa Fe 1126.

Los colaboradores son colegas de la Universidad Nacional de Tres de Febrero (UNTREF) de la carrera Ingeniería de Sonido, personas idóneas para realizar este tipo de trabajo de campo.

2.4.3 Metodología de conteo manual de aforo vehicular utilizado para la elaboración del mapa de ruido de las Comunas de Antofagasta y Providencia, de Chile.

La metodología empleada en el “Estudio de levantamiento de información de entrada de modelo de predicción de ruido y aplicación en caso piloto” (Comisión Nacional del Medio Ambiente de Chile, 2008) utilizado por el gobierno de Chile para la realización del Mapa de Ruido de las comunas de Providencia y Antofagasta se divide en los siguientes pasos:

1. Contar el aforo vehicular en horario pico, durante 15 minutos, discriminando entre tránsito liviano y tránsito pesado.
2. Contar el aforo vehicular en horario no pico, durante 15 minutos, discriminando entre tránsito liviano y tránsito pesado.
3. Realizar un promedio ponderado de los aforos livianos y pesados medidos en horario pico y no pico considerando 4 horas pico y 20 horas no pico. En la Tabla III junto con la Ec. (1) se ejemplifica el calculo que se debe realizar, tomando como ejemplo los aforos de una calle de la comuna de Antofagasta, Chile.

Tabla III: Modelo de tabla que se utiliza para el conteo de aforo vehicular.

Calle Punto de Medición	Conteo de Vehículos				Promedio ponderado hora
	Hora no Pico (15 min)		Hora Pico (15 min)		
	Livianos	Pesados	Livianos	Pesados	
14 de Febrero	119 (A)	6 (B)	234 (C)	11 (D)	580 (E)

$$\left(\frac{(A + B) \cdot 20hs + (C + D) \cdot 4hs}{24hs} \right) \cdot 4 = E \quad (1)$$

4. Si la calle posee doble sentido de circulación se procede de la misma manera, pero se suman los caudales contados en cada sentido.

Resulta necesario tomar en cuenta las siguientes consideraciones. En primer lugar, para el caso de Chile, se define como hora pico a los períodos comprendidos entre las 7:00 hs y 9:00 hs y entre las 18:00 hs y 20:00 hs. La hora no pico se define como las franjas horarias complementarias a las recién mencionadas para completar las 24 hs del día (Comisión Nacional del Medio Ambiente de Chile, 2008). Antes de proceder con esta metodología es interesante analizar las franjas horarias denominadas pico y no pico en la CABA. Con ese fin se está gestionando la posibilidad de acceder a los perfiles de demanda principales de la CABA donde se puedan definir las horas pico y no pico.

Una vez definidos los períodos de horas pico y no pico que describen el flujo vehicular normal de la CABA se procede a realizar el conteo manual de aforo respetando las mismas condiciones y procedimientos considerados para el conteo con el método propuesto por el autor. Es decir, se realiza también con cuatro colaboradores, la misma aplicación de celular y se procede de la misma manera a promediar los resultados obtenidos por cada pareja situada a cada lado de la calle y luego se suman los dos promedios, ya que cada pareja releva la mitad de los carriles de la calzada. Por último, se realizará la comparación de los valores obtenidos con ambas metodologías. En caso de validar, se considerará la metodología propuesta como válida y se procederá a realizar las simulaciones acústicas

con los aforos contabilizados bajo dicha metodología. Caso contrario, se realizarán las simulaciones con los aforos arrojados por la metodología empleada en Chile.

2.5 SIMULACIÓN ACÚSTICA.

Se realizan todas las simulaciones acústicas en el software CadnaA de Datakustik versión 4.0, con una licencia oficial facilitada por la Universidad Nacional de Tres de Febrero, al igual que el software original. Se utilizan todos los objetos con sus respectivas configuraciones y las propias configuraciones de cálculo que se contemplaron por la APrA en el momento de realizar el mapa de ruido de la CABA. De esta forma se garantiza que la única variable que se modifica entre la simulación realizada por la APrA y las simulaciones que se llevan a cabo en esta investigación es el aforo vehicular. En la Fig. 7 se presentan los entornos 2D y 3D del punto de análisis Santa Fe 1126.

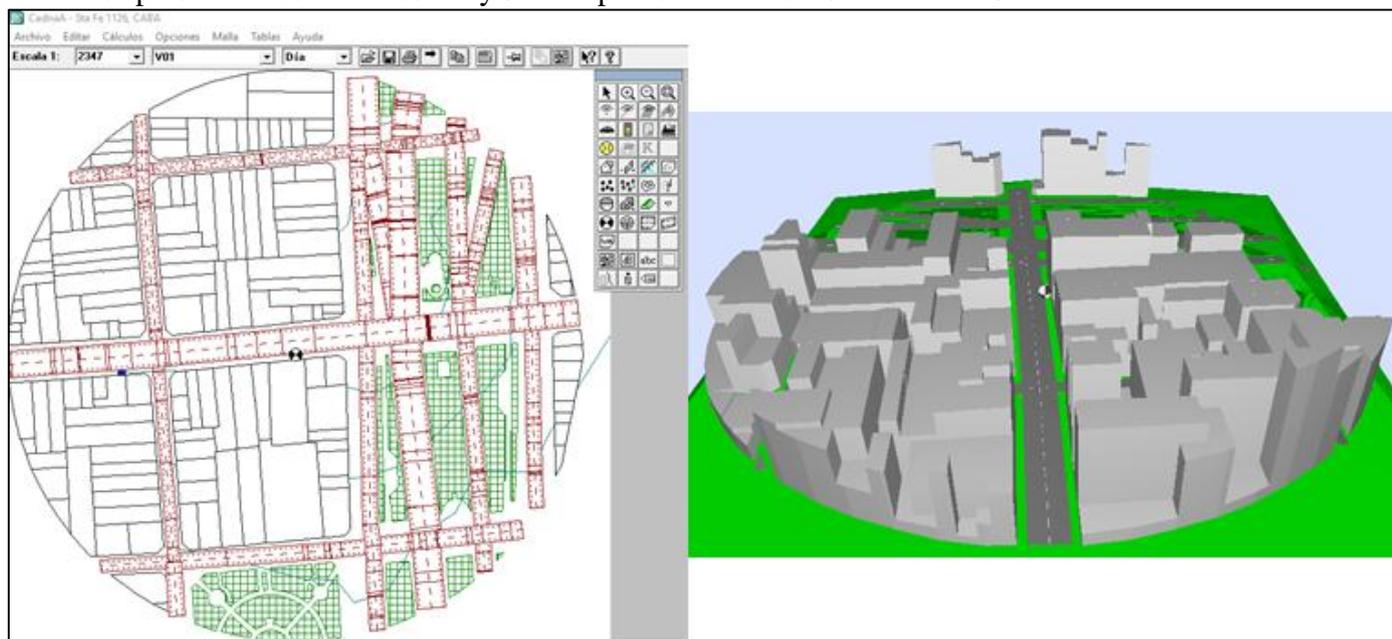


Fig. 7: Vista superior del entorno modelado con radio de 200 m centrado en el receptor y vista 3D completa del entorno modelado con radio de 200 m centrado en el receptor.

Se simula cuatro veces (L_{day} S1, L_{day} S2, L_{day} S3 y L_{day} S4) mediante el método de cálculo francés NMPB-Routes-96 alternando las variables entre medidas y obtenidas del modelo vehicular. En la Tabla IV se describen las distintas simulaciones que se llevan a cabo y las variables correspondientes a cada una.

Tabla IV: Descripción de las simulaciones a comparar entre aforo medido y utilizado en el Mapa de Ruido de la CABA.

Referencias	Nº Simulación	Tránsito Liviano	Tránsito Pesado
L_{eqA} Medido por APRA	L_{eqA} M	-	-
L_{day} Simulado 1	L_{day} S1	Utilizado en Mapa	Utilizado en Mapa
L_{day} Simulado 2	L_{day} S2	Utilizado en Mapa	Conteo
L_{day} Simulado 3	L_{day} S3	Conteo	Utilizado en Mapa
L_{day} Simulado 4	L_{day} S4	Conteo	Conteo

4. RESULTADOS Y CONCLUSIONES PRELIMINARES

Se presentan los resultados preliminares para el caso piloto de “Avenida Santa Fe 1126”. En la Tabla V se presentan los valores que tomaron las variables “Total” y “% Peasados”, requeridos por el software para realizar la simulación acústica.

Tabla V: Aforos correspondientes a cada simulación acústica.

	Liviano	Pesado	Liviano	Pesado	Total	% Pesados
Situación 1	Mapa	Mapa	1714	256	1970	13,0%
Situación 2	<i>Conteo</i>	Mapa	1437	256	1693	15,1%
Situación 3	Mapa	<i>Conteo</i>	1714	378	2092	18,1%
Situación 4	<i>Conteo</i>	<i>Conteo</i>	1437	378	1815	20,8%

Se realizan las simulaciones para cada Situación (1, 2, 3 y 4), y se observan los resultados en la Tabla VI.

Tabla VI: Resultados de cada simulación acústica.

	LeqA VALIDACIÓN (dBA)	L_{day} (dBA)	Dif
Situación 1	75,4	79,1	3,7
Situación 2	75,4	78,9	3,5
Situación 3	75,4	79,6	4,2
Situación 4	75,4	80	4,6

Solo con los resultados del caso piloto resulta apresurado obtener conclusiones robustas. De todas formas, se puede apreciar en este ejemplo que de las 4 situaciones hay dos en las que la diferencia de validación es mayor a 4dB (límite utilizado por la APrA para evaluar la validación). Son los casos de la Situación 3 y 4, en ambas la variable “Pesado” es adoptada del conteo manual realizado en esta investigación.

Con resultados de otros puntos del mapa de ruido de la CABA será posible analizar en profundidad la injerencia de cada variable en el error total de validación de cada punto estudiado del mapa de ruido de la CABA.

REFERENCIAS

- Agency European Environment, Transport and public health (2016).
 Agency European Environment, Transport at a crossroads (2009).
 Comisión Nacional del Medio Ambiente de Chile, “Levantamiento de información de entrada de modelo de predicción de ruido y aplicación en caso piloto”, Chile, 2008.
 European Commission Environment DG, "Good Practice Guide for Strategic Noise Mapping and the production of Associated Data on Noise Exposure, European Commission Working Group, Bruselas, 2006.
 Gobierno de la Ciudad de Buenos Aires, Decreto N° 740/GCBA/07, 2007.
 Gobierno de la Ciudad de Buenos Aires, Ley N° 1540/04 - Control de la Contaminación Acústica en la Ciudad Autónoma de Buenos Aires. Buenos Aires, 2004.
 Haedo, A., Shaw, S., Polakovic, A., de Di Marco, S., Ruffa, F., Saez Seco, R., Gavinovich, D., Glaubach, N. , "Mediciones de Ruido en la Ciudad de Buenos Aires. Memoria," Laboratorio de Electroacústica, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de Buenos Aires, Buenos Aires, 1973.
 Miyara, F., Miechi, P., Pash, V. I., Caballenas, S., Yanitelli, M., Accolti., E.: “Tiempos de estabilización del espectro del ruido de tránsito”. VI Congreso Iberoamericano de Acústica – FIA. Buenos Aires, Argentina. (2008).

- Pacheco, J. F. Franco, and E. Behrentz, Caracterización de los niveles de contaminación auditiva en Bogotá: Estudio piloto, Revista de ingeniería, Universidad de los Andes, Bogotá, Colombia, 72–80 (2009).
- R. D. Ottobre, G. Said, L. Carilli, and F. A. Deuschle, "Mapa de Ruido de la Ciudad de Buenos Aires, Argentina, Primera Etapa: Planteo Metodológico y Presentación del Mapa de Ruido de la Comuna 4," FIA, IX Congreso iberoamericano de Acústica, Valdivia, Chile, Paper 2014.
- Stasi, A., "Estudio comparativo entre modelos predictivos de ruido de tránsito vehicular y mediciones de validación en la Ciudad Autónoma de Buenos Aires", Universidad Nacional de Tres de Febrero, Caseros, Tesis de Grado, 2017.

EXPERIMENTAL MODAL ANALYSIS BASED ON NON-CONTACT MEASUREMENTS WITH A COMMERCIAL MICROPHONE ARRAY

Garcia, J.^a, Boelke, O.^b, and Heimann, J.^b

^aUniversidad Nacional de Tres de Febrero, ARGENTINA

^bgfai tech gmbh, Volmerstrasse, 3 12489 Berlín, ALEMANIA

e-mail: joaquin.garcia1900@hotmail.com

RESUMEN

Experimental modal analysis (EMA) is a tool for measuring the dynamic properties of structures under vibration excitation. In order to improve the understanding of the structural dynamic behavior of complex structures, modal parameters, such as eigenfrequencies, damping ratios, and mode shapes are of high importance. Furthermore, based on the mode shapes, the structural integrity of a component can be assessed and monitored. Usually, EMA results are also used in research and development for the validation and optimization of numerical models (Model Updating). The advantage of a non-contact measurement of the vibration patterns is that there is no damage or contamination of the material surface. In addition, the modal quantities are not contaminated by the additional weight of vibration transducers, so that the dynamic response of the system is not influenced by the measurement itself. In contrast to other non-contact methods (e.g. laser vibrometers), the use of a suitable microphone array allows the simultaneous detection of the entire surface vibration covered by the array. Time-consuming, selective measurements of individual measuring points and the merging to point clouds are therefore no longer necessary. The modal analysis method is demonstrated in experiments on application-oriented, large-area structures. The parameter of interest, the mode shapes, are determined by measuring the pressure fluctuations in the near field of the structure. A commercial 120-channel microphone array with an integrated optical camera (Fibonacci120 AC Pro by gfai tech GmbH) is used for this purpose. The integrated optical camera allows to assign the measured system response to the corresponding surface section. The entire surface of the examined structures is covered by the planar microphone array, which has a diameter of 1 m. Measurements with a laser vibrometer are used to validate the data obtained from the microphone measurements. The modal assurance criterion (MAC) is used to compare the mode shapes determined by both methods.

Keywords: ACOUSTIC CAMERA, SONAH, MODAL ANALYSIS

1. INTRODUCTION

Strong structural vibrations not only cause disturbing noise, but can also lead to structural wear at high amplitudes or long operation durations. Modal models can be used to identify structures that vibrate strongly or are tending to load fractures. After a structural excitation by a defined force (e.g. by means of an impulse hammer or a shaker), the structural response can be recorded by measuring, for example, the surface vibrations.

By referencing the system response with the introduced force, the structure-dependent modal parameters such as mode shapes, eigenfrequencies, damping ratios can be

determined. With the information obtained, it is possible to analyse the structural dynamic behavior of even complex structures. Furthermore, the modal parameters will also be used, for example, in design processes, for predicting vibration behaviour at certain operating points or for identifying structure-critical geometries. Usually the structural vibrations are captured by acceleration probes or by using laser Doppler vibrometry (LDV). However, the measuring effort for the scanning of a large number of individually defined surface points is very high. In addition, the vibration system can be detuned by attaching additional sensors. Recent studies show that non-contact measurement or excitation methods can be used, especially for the analysis of very light or sensitive structures [1].

Therefore, this paper concentrates on the possibility of determining the eigenmodes by sound pressure measurements with a microphone array. In current studies, such as [2], qualitative investigations of the determined modes have already been carried out, whereby the used algorithms usually provide unsatisfying results. In this paper the measured pressure fluctuations are assigned to the surface vibrations using the near-field holography method SONAH („Statistically Optimal Near-field Acoustical Holography“) [3]. Furthermore, the analyses of the data collected by a commercial microphone array (Fibonacci120 AC Pro from gfai tech GmbH) are carried out with the software „NoiseImage“. In order to evaluate the quality of the eigenmodes determined, they are compared with those from LDV measurements and the theoretical vibration modes from a finite element analysis (FEA) using the modal assurance criterion (MAC) [4]. The latter is a statistical indicator for the comparability of two mode shapes.

2. THEORETICAL BACKGROUND

The determination of modal parameters based on experimental data is called experimental modal analysis (EMA). These parameters are usually obtained by curve-fitting algorithms. In contrast to EMA, which is based on experimental data, FEA uses analytical equations of motion for a structure using finite element modeling (FEM). Thereby the modal parameters are solutions of the resulting system of equations. The FEM results discussed in the following were created with help of the software called WaveImage. The MAC is often used to compare analytical mode shapes with experimentally determined mode shapes.

a. EXPERIMENTAL MODAL ANALYSIS

For this paper the EMA module of gfai tech's software WaveImage is used. The evaluations are based on the frequency response function, which is determined from the measured force excitation and the measured system response. The modal parameters are determined from the frequency response function using the Polyreference Least Squares Complex Frequency (POLY-LSCF) algorithm [5]. The POLYLSCF algorithm uses (weighted) least square approaches of multiple-input-multiple-output frequency response functions. The stability diagrams determined during the analysis allow an easy analysis even of complex systems with highly damped modes and/or large modal overlap. Further information on mathematical implementation and validation using experimental and numerical models can be found in the work of Peeter et. al [6] and Phillips et. al [5].

b. MODAL ASSURANCE CRITERION

The MAC is defined as the normalized scalar product of two modal vectors v_i, v_j [4]:

$$MAC_{ij} = \frac{|v_i^H v_j|^2}{(v_i^H v_i)(v_j^H v_j)} \quad (1)$$

where $(\cdot)^H$ is the complex conjugate transpose (Hermitian) of a matrix.

The MAC is a statistical indicator that can be used as a measure of the quantitative comparability of two modal forms. A MAC value of 0 indicates that the modes are not consistent and a value of 1 represents a fully consistent mode shape [4]. Therefore, the MAC matrix (cross correlation of all modes in a given range) obtained by EMA and/or FEA consists of zeros, except in the diagonal where the values are close to 1. Under certain conditions, such as a stationary, linear system state, the MAC can also be taken as a criterion for the orthogonality of the compared modes. However, the MAC values must be interpreted according to the measurement situation: On the one hand an insufficient local resolution of two orthogonal mode shapes can lead to high MAC values, while on the other hand lower values can be achieved e.g. by noisy measurement signals [4].

c. SONAH

Acoustic near-field holography describes a method of estimating the sound field on the source surface by measuring the acoustic quantities (usually sound pressure or sound velocity) at a small distance from the source surface. The requirements on the microphone array when using traditional nearfield acoustical holography (NAH) are very high. A uniform microphone arrangement is required, where the array covers the entire sound source. In addition, the minimum microphone distance must be less than half the wavelength at the highest frequency of interest. However, SONAH does not have these restrictions: It can not only work with irregular arrays, it also gives good results when the array is smaller than the source [3]. The latter is due to the fact that, unlike traditional NAH, the strong spatial window effects do not occur [7].

The publication of Puhle et. al [8] describes, among other things, the mathematical implementation of two advanced NAH methods such as SONAH and HELS (Helmholtz equation Least-Squares). In addition, Puhle et. al. also qualitative validates the experimentally determined mode shapes from acoustic measurements using SONAH and HELS with LDV-measurements. This work continues the investigations by concentrating not only on the amplitudes of the calculated surface oscillations, but also on the complex amplitude including the spatially distributed phase. Thus, the MAC is used to quantify the quality of certain mode shapes using FEM, LDV and SONAH.

3. MEASUREMENT SETUP

The system response of a stainless-steel plate to a force excitation was investigated. The stainless-Steel plate (600mm x 600mm x 4 mm) with holes (7mm in diameter) in each corner was attached to a frame with rubber bands. Thus, free boundary conditions can be assumed on the entire surface. In order to get a power transmission only normal to the surface, the plate was excited by a shaker (PCB SmartShaker with integrated power amplifier, model K2007E01) via a thin stinger (diameter approx. 2 mm). The stinger with

force sensor (PCB type 208C02) was mounted in the upper right corner of the plate, see Fig. 1 (left). The excitation signal was white noise with frequencies up to 1kHz. The response of the plate to the excitation was measured with an LDV and a microphone array. In order to obtain the best possible signal-to-noise ratio, the acoustic measurements were performed in an anechoic chamber.

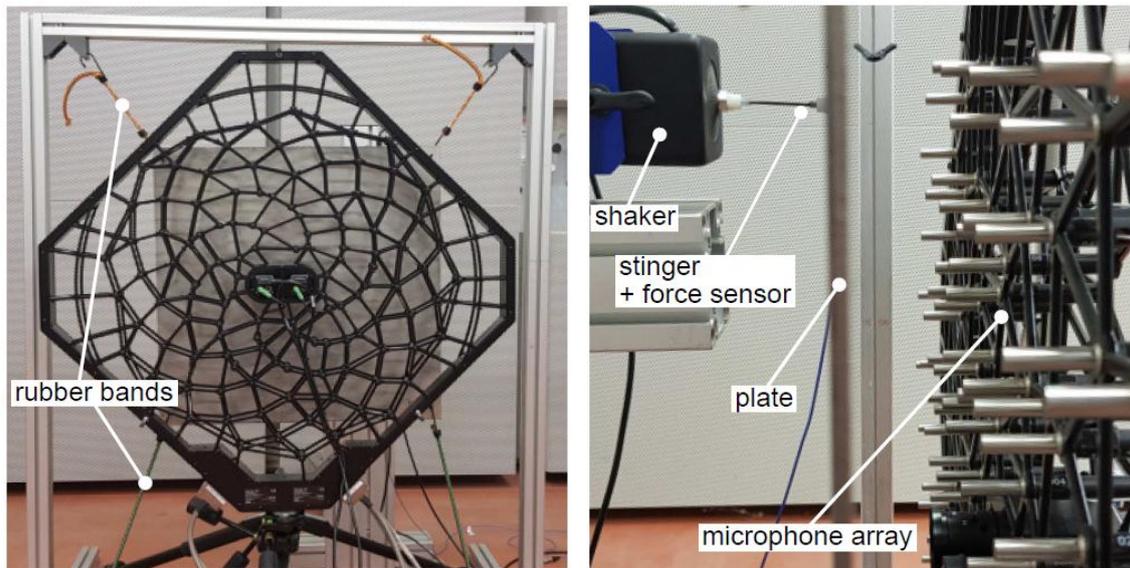


Figure 1: Setup for measuring the acoustic sound field with a microphone array (Fibonacci120 AC Pro, gfai tech GmbH) in an anechoic chamber. Left: alignment of shaker, plate and microphone array; Right: rubber band mounted plate with parallel microphone array.

The acoustic array used (Acoustic Camera Fibonacci 120 AC Pro by gfai tech GmbH) is a multifunctional array and is suitable for SONAH as well as acoustic beamforming. The array was aligned parallel and centered to the plate so that all 120 microphones had a distance of 14mm ($\pm 0,5$ mm) to the plate, see Fig. 1. The pressure data (measuring time of 16 s, sampling rate 48 kHz) were recorded by a data acquisition system (mcdRec 721B, gfai tech GmbH). The software NoiseImage was used to evaluate the particle velocity on the surface of the plate. As a reference to the acoustic data, the surface vibrations were also measured using an LDV measurement system (PSV-500 Scanning Vibrometer Full-Field Vibration Measurement System, Polytec). 377 measuring points distributed equidistantly over the whole surface of the plate were scanned.

4. RESULTS

The mode shapes from the FEM (left) and the EMA based on the LDV (middle) and SONAH (right) measurement data are shown in Fig. 2 to 11. The first 10 modes that occur at excitation frequencies above 100 Hz are displayed. To ensure comparability, all pictures show the same centered plate section (50 cm x 50 cm) with the same color scale. The upper image series shows the normalized vibration amplitude, while the lower image series shows the corresponding phase. Regardless of the chosen method, the mode shapes calculated by the FEM could be found. Only the 11th mode (see Fig. 7) could not be determined from the acoustic data. It is noticeable, however, that the amplitudes in the middle of the plate are generally slightly overestimated using SONAH. This is probably

caused due to the low density of the microphones in the middle of the microphone array, where two optical cameras (fisheye optic for SONAH and wide angle optic for beamforming) are located. The relative phase distribution of the corresponding mode shapes determined in the comparison of the three methods shows only minor differences. At this point it should be noted that inverted phases occur due to the normalized visualization of the eigenvector in the representation (see e.g. Fig.5 and Fig.6). Since the relative phase relations to the different points on the surface remain the same, this has no influence on the quality of the results.

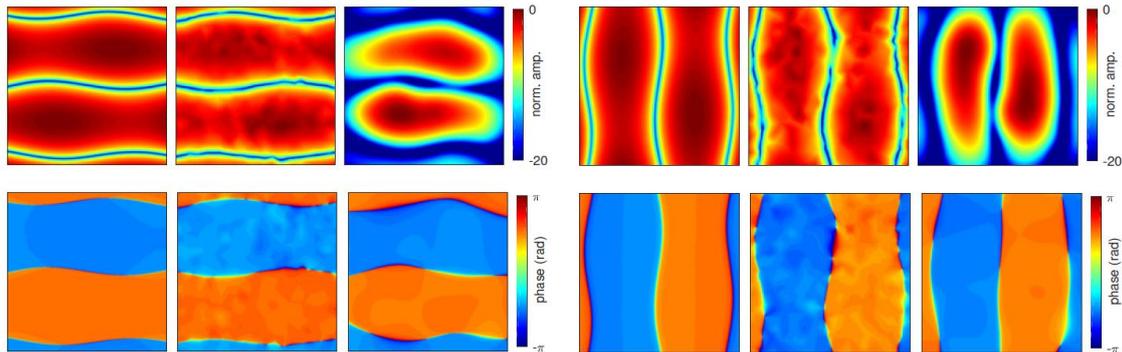


Figure 2: Amplitude (top) and phase (bottom) of mode No 6; FEM (left), LDV 161 Hz (middle), SONAH 163 Hz (right)

Figure 3: Amplitude (top) and phase (bottom) of mode No 7; FEM (left), LDV 164 Hz (middle), SONAH 165 Hz (right)

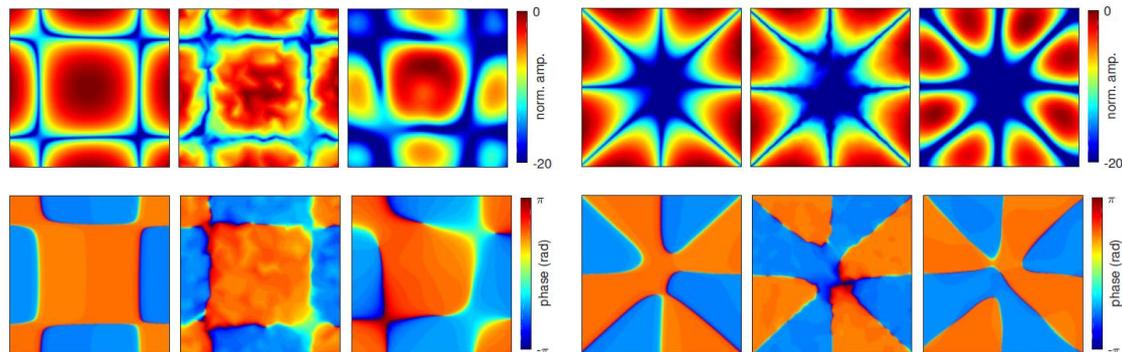


Figure 4: Amplitude (top) and phase (bottom) of mode No 8; FEM (left), LDV 170 Hz (middle), SONAH 172 Hz (right)

Figure 5: Amplitude (top) and phase (bottom) of mode No 9; FEM (left), LDV 187 Hz (middle), SONAH 186 Hz (right)

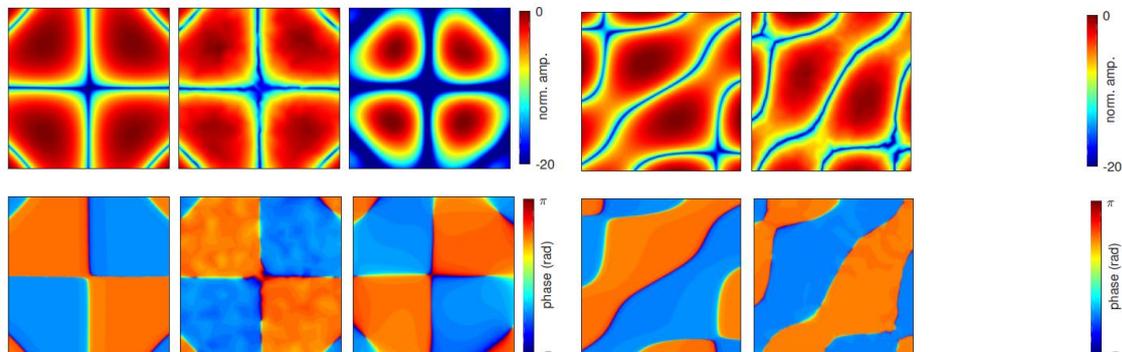


Figure 6: Amplitude (top) and phase (bottom) of mode No 10; FEM (left), LDV 203 Hz (middle), SONAH 206 Hz (right)

Figure 7: Amplitude (top) and phase (bottom) of mode No 11; FEM (left), LDV 265 Hz (middle), SONAH not found

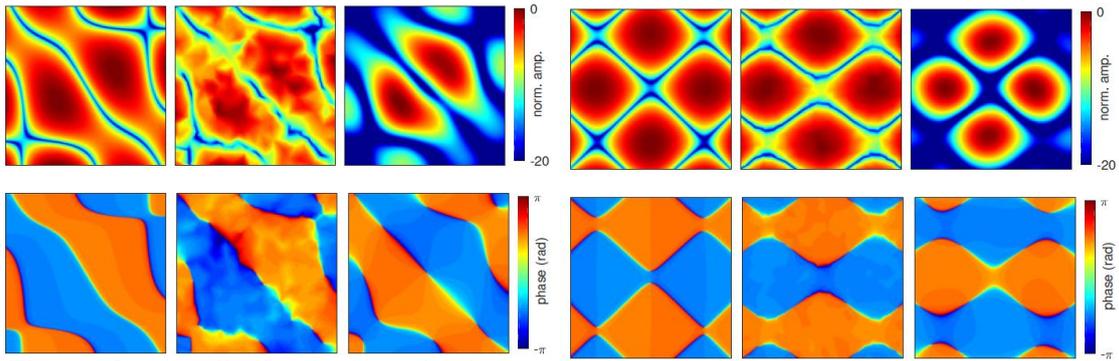


Figure 8: Amplitude (top) and phase (bottom) of mode No 12; FEM (left), LDV 281 Hz (middle), SONAH 280 Hz (right)

Figure 9: Amplitude (top) and phase (bottom) of mode No 13; FEM (left), LDV 313 Hz (middle), SONAH 313 Hz (right)

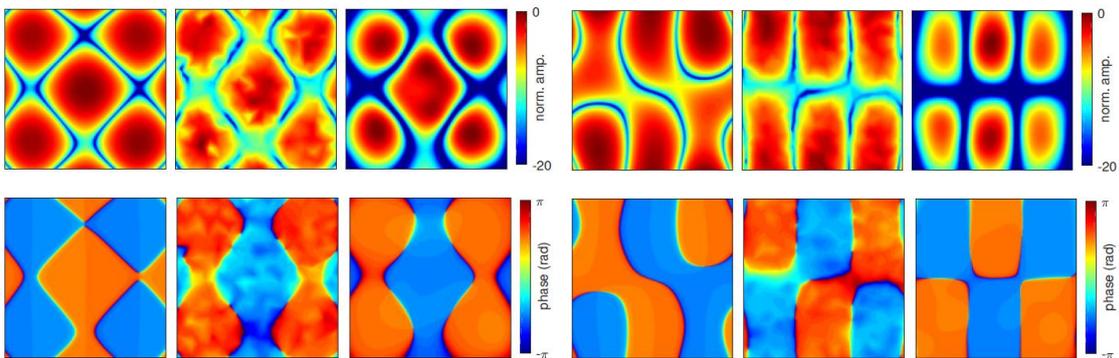


Figure 10: Amplitude (top) and phase (bottom) of mode No 14; FEM (left), LDV 324 Hz (middle), SONAH 324 Hz (right)

Figure 11: Amplitude (top) and phase (bottom) of mode No 15; FEM (left), LDV 350 Hz (middle), SONAH 350 Hz (right)

In order to compare the mode shapes determined by LDV and SONAH with the numerically calculated mode shapes, the corresponding MAC matrices using Eq. (1) were created. Figure 12 shows the MAC matrix of the following combinations: (a): mode shapes of SONAH only (auto-MAC); (b): mode shapes of FEM and LDV; (c): mode shapes of FEM and SONAH. The results of the auto-MAC (Fig. 12a) show almost exclusively high values only on the diagonal, whereby a strong linear independence of the determined modes can be assumed. Only a comparison of the 6th with the 12th mode shows a relevant high MAC values of 0.46. When using a microphone array it should be noted that the spatial resolution of the measured eigenmodes depends on (analogous to the measuring point density when using a LDV). Thus, further investigations must show whether the insufficient separation of the mode shapes observed here can be improved by a higher measuring point density (more microphones) or a different positioning of the microphone array. The cross-MAC matrices compare the numerically determined mode shapes with those from the LDV measurements (Fig. 12b) and with those from the modes determined by SONAH (Fig. 12c), respectively. It is worth mentioning that the 11th mode, which could not be extracted from the acoustic data, could also only be determined poorly with LDV.

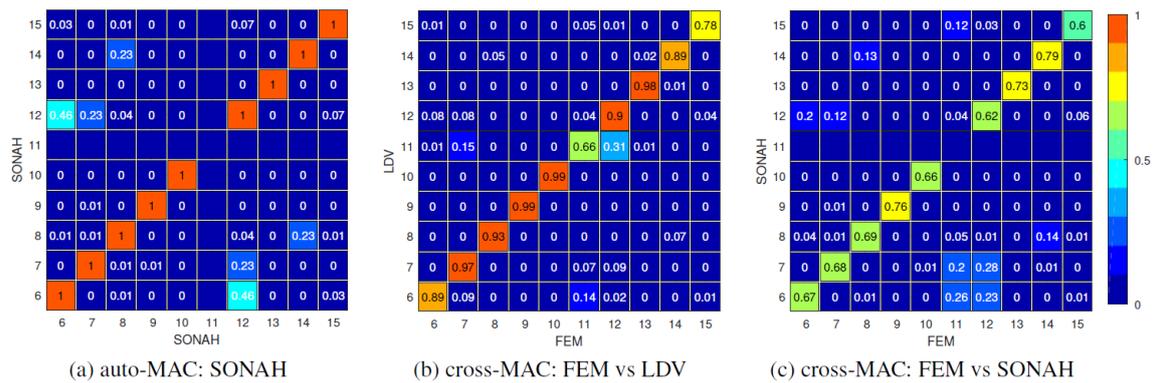


Figure 12: Calculated MAC values by Eq. (1).

The reason for this may be that the force introduction is at a position that is disadvantageous for this mode (node of the mode). A comparison of the two cross-MAC matrices shows that all modes determined by LDV measurements correspond very well with the numerical modes. Although the MAC values based on SONAH result in lower values, it is also possible to clearly assign them to the numerically ideal values.

5. CONCLUSIONS

In this work it could be shown that beside the complex mode shapes also the corresponding resonance frequencies can be determined. When using an LDV scanning system, approximately 5 – 30 s are required to capture the surface vibrations at one point. However, during the same measurement time, the overall vibration behaviour of the surface of the plate can be estimated using a microphone array. The advantage of the commercial microphone array used here is its flexibility. It can not only be used for SONAH, but is also very well suited for localizing sound sources by means of acoustic beamforming due to the spiral arrangement of the microphones. However, the microphone arrangement is a compromise between these two measurement methods, which leads to inaccuracies in the vibration amplitude when comparing the LDV-determined mode shapes, especially in the outer area of the plate. The phase distribution, however, can be determined correctly for each mode number examined here. This shows that one EMA, based on the measurement using an acoustic array, is particularly relevant for comparison measurements, e.g. end-of-line quality control.

REFERENCES

1. Farshidi, R., Trieu, D., Park, S. S., and Freiheit, T. Non-contact experimental modal analysis using air excitation and a microphone array. *Measurement*, 43 (6), 755–765, (2010).
2. Velsen, A. L. van, Moers, E. M. T., Arteaga, I. L., and Nijmeijer, H. Plate mode identification using modal analysis based on microphone array measurements. *Euronoise*. (2015).
3. Brüel & Kjær. Technical Review No. 1. , (2005).
4. Pastor, M., Binda, M., and Harcarik, T. Modal Assurance Criterion. *Procedia Engineering*, 48, 543–548, (2012).

5. Phillips, A.W. and Allemang, R. J. A Low Order Implementation of the Polyreference Least Squares Complex Frequency (LSCF) Algorithm. International Conference on Noise and Vibration Engineering. (2004).
6. Peeters, B., Guillaume, P., Auweraer, H. V. D., Cauberghe, B., Verboven, P., and Leuridan, J. Automotive and aerospace applications of the PolyMAX modal parameter estimation method. IMAC. Vol. 22. (2004).
7. Steiner, R. and Hald, J. Near-field Acoustical Holography without the Errors and Limitations Caused by the Use of Spatial DFT. International Journal of Acoustics and Vibration, 6 (2), 83–89, (2001).
8. Puhle, C. On the sunflower spiral: acoustical holography results. InterNoise. (2016).

EMISSÃO ACÚSTICA APLICADA NO MONITORAMENTO DA INTEGRIDADE DE ESTRUTURAS LAMINARES (GUIAS DE ONDAS): ESTUDO NUMÉRICO

Groth E. B.^a, Schumacher Silva G.^b, Idzi J.^c, Rojo Tanzi B. N.^{b, c}, Clarke T. G. R.^a, Jacques R. C.^a, Iturrioz I.^b

^a *Laboratório de Metalurgia Física LAMEF, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, BRASIL*

^b *Grupo de Mecânica Aplicada GMAP, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, BRASIL*

^c *Facultad de Ingeniería. Universidad Nacional de La Plata, La Plata ARGENTINA*

e-mail: eduardo.groth@ufrgs.br

RESUMO

O monitoramento da integridade de estruturas de responsabilidade tais como pontes, tubulações, fuselagem de aviões, etc., é um tema de grande interesse de pesquisadores e indústria. O desenvolvimento dessas técnicas de avaliação está estreitamente conectado com o avanço de novos materiais, com novas propriedades, comportamento e demais características que, por conseguinte acaba abrindo a possibilidade de novos designs de transdutores, inclusive para o trabalho com propagação de ondas mecânicas, que é um fenômeno muito utilizado em ensaios não destrutivos. A técnica de Emissão Acústica registra a emissão de ondas produzidas pela estrutura quando ela é solicitada. Estas emissões podem ser devidas a rupturas internas dentro da estrutura avaliada. Estas rupturas produzem ondas que viajam na estrutura laminar condicionada pelas suas características geométricas as chamadas ondas guiadas. No presente trabalho se tem como objetivo geral o desenvolvimento de sensores dedicados ao tipo de estrutura estudada. Nesse contexto o presente artigo propõe uma modelagem numérica do fenômeno da emissão acústica para a compreensão do sinal gerado, dando assim subsídios para o desenho de sensores ressonantes de alta sensibilidade.

Palavras chave: Monitoramento, emissão acústica, DEM, frequência natural, ondas guiadas.

1. INTRODUÇÃO

A técnica de emissão acústica consiste em captar as ondas elásticas geradas na estrutura submetida a um determinado estado de carga. É possível correlacionar o tipo específico de dano produzido com um padrão da forma do evento de emissão acústica. A sequência dos eventos também fornece informação importante sobre o modo de colapso esperado. Quando algum tipo de dano interno acontece na estrutura, isto produz um câmbio no balanço das energias em jogo, onde parte da energia elástica acumulada na estrutura é dissipada e se esta mudança é localmente instável, a energia cinética participará do balanço energético e sua aparição sinaliza que ondas elástica viajaram pela estrutura até o sensor que realiza o registro dos eventos de emissão acústica. O relato anterior deixa claro que a relação entre a energia dissipada e o evento registrado não é direta. Grande esforço teórico tem sido realizado com a intenção de relacionar magnitude e localização

da ruptura e o evento gerados e também sobre tipo de colapso esperado e sequência dos mesmos. Muitos desenvolvimentos realizados na área da sismologia nos quais as dimensões em jogo são da ordem de centenas de *km* podem ser aplicados na interpretação de eventos de emissão acústica em escala de metros. Uma produção bibliográfica muito grande na área pode ser consultada entre eles destacamos como fundamental Grosse e Ohtsu (2008) e American Society for Nondestructive Testing (2005) o. O monitoramento de estruturas prevendo a medição de eventos de emissão acústica permite um controle sobre a integridade da mesma, estimativa de vida útil remanescente e segurança na operação ao qual a estrutura está inserida.

Um dos grandes desafios no monitoramento das emissões acústicas é o ruído ambiente que é percebido pelos sensores. Muitas vezes um evento, dependendo da distância ao ponto de monitoramento, tem a amplitude de deslocamento abaixo do nível do ruído ambiente, o que torna a emissão acústica imperceptível nesse caso. Também existe a ocorrência frequente do componente monitorado estar inserido num ambiente com diversas fontes de ruídos como máquinas rotativas, escoamentos de fluídos, choques e até mesmo a chuva sendo que estes fatores podem ser um grande empecilho para a aplicação desta técnica, American Society for Nondestructive Testing (2005). Uma forma de minimizar estes efeitos seria desenvolver sensores dedicados a estrutura que se deseja avaliar onde tipos de defeito e formas de propagar ondas sejam característicos.

Inserido nesse contexto o presente trabalho explora, utilizando simulação numérica, técnicas que auxiliem no desenvolvimento de sensores maximizando sua sensibilidade a emissão acústica relacionada a ruptura interna e minimizando os ruídos ambientes, permitindo um melhor aproveitamento das emissões acústicas no sentido do monitoramento da integridade de estruturas e componentes.

2. DESENVOLVIMENTO

A modelagem numérica da ruptura espontânea não é trivial e o método dos elementos finitos convencional não é capaz de reproduzir esse fenômeno. A alternativa adotada no presente trabalho é uma versão do método dos elementos discretos (LDEM), inicialmente proposto por Riera (1984). Esse método discretiza o domínio num arranjo regular de barras, na Fig. 1 se apresenta o modulo cúbico básico que replicado permite gerar o domínio de interesse.

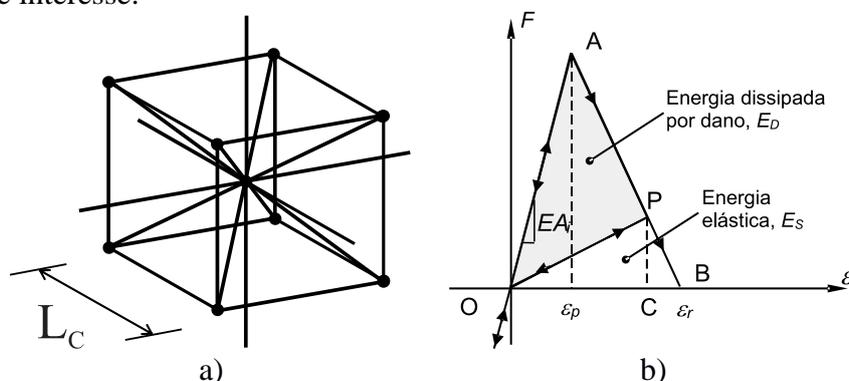


Figura1: a) Modulo Cúbico Básico da versão do Método dos elementos Discretos utilizado. b) Relação bilinear utilizada como lei constitutiva das barras.

A massa está agrupada nos nós, cada nó possui três graus de liberdade, correspondentes aos deslocamentos nodais nas três direções ortogonais. As equações que relacionam as propriedades do elemento com as constantes elásticas do meio isotrópico são,

$$\eta = \frac{9\nu}{4 - 8\nu}, \quad EA_n = EL_c^2 \frac{(9 + 8\eta)}{2(9 + 12\eta)}, \quad EA_d = \frac{2\sqrt{3}}{3} A_n \quad (1)$$

onde E é o módulo de elasticidade e ν é o coeficiente de Poisson, e A_n e A_d são as áreas dos elementos normais e diagonais e L_c é o comprimento do lado do arranjo cúbico básico. As equações de movimento resultantes obtidas com essa discretização espacial podem ser escritas na forma,

$$M\ddot{x}(t) + C\dot{x}(t) + F_r(t) - P(t) = 0, \quad (2)$$

onde x representa um vetor de deslocamentos dos nós. M é a matriz de massa diagonal e C a matriz de amortecimento, F_r é o vetor de forças internas agindo sobre as massas nodais e P é o vetor de forças externas. A integração no domínio é feita através das diferenças finitas centrais que permite grandes deformações.

No modelo LDEM implementado nesse artigo foi adotada uma relação entre a força e a deformação axial em cada barra baseada na lei bilinear proposta por Hillerborg (1978), apresentada na Fig. 1.b. A energia de fratura específica, G_f , é diretamente proporcional a área abaixo desta lei bilinear. Uma característica importante desse modelo é a distribuição aleatória do valor de G_f de cada barra, que segue uma distribuição de probabilidades tipo Weibull que precisa para ser definida de um valor médio, seu coeficiente de variabilidade e o comprimento de correlação do campo espacial a ser gerado. A versão mais simples implica em considerar que o campo aleatório gerado tem o mesmo tamanho que a discretização adotada, mas é possível ter comprimentos de correlação diferentes nas três direções ortogonais com valores diferentes da discretização adotada.

A relação entre a deformação crítica o módulo de elasticidade e a tenacidade do material se realiza utilizando uma quarta propriedade do material chamada de dimensão característica intrínseca do material d_{eq} , desta forma,

$$p = \sqrt{\frac{G_f}{E d_{eq}}} \quad (3)$$

o d_{eq} seria a dimensão que se tornaria crítica se acontecesse dentro do domínio considerado uma fissura destas dimensões, se o valor d_{eq} é maior que o tamanho da dimensão característica da estrutura nunca aconteceu a situação crítica. Mais detalhes sobre a formulação do modelo se pode encontrar em Birck et. al. (2016).

2.1 Modelo híbrido DEM – FEM

Acoplar o método dos elementos finitos e a versão do método dos elementos discretos aqui apresentado pode ser uma saída para reduzir a quantidade de graus de liberdade, dentro do tipo de problema que será analisado. Esta implementação foi já apresentada em Kostas et. al. (2015). No problema em estudo a região onde se vai produzir a ruptura

interna no material será modelado com LDEM e o resto com Elementos Finitos para permitir a onda gerada propagar até onde o sensor capturar o sinal.

2.2 Exemplo de aplicação

Para validar os resultados obtidos acoplado o modelo de LDEM e método dos elementos finitos se estuda uma haste retangular de aço baixo carbono (SAE 1020) com $E = 210GPa$, $\rho = 7850kg/m^3$ e $\nu = 0,25$. A distribuição espacial dos carregamentos aplicados e descrito na Fig. 3. Sua variação no tempo definida por uma onda Tone Burst com uma frequência principal de $10kHz$. A haste em estudo tem dimensões de $15 \times 5 \times 500mm$. A resposta é registrada no ponto de controle que se localiza a uma distância de $400mm$ da face frontal da chapa conforme mostra a Fig. 3.

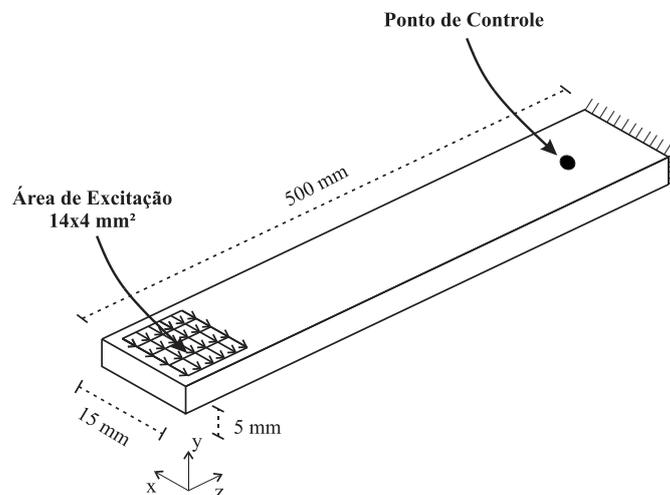


Figura 3 Condições de contorno da haste em análise. A função temporal adotada foi uma onda Tone Burst com 5 ondas e uma frequência principal de $10kHz$.

Foram construídos três modelos distintos, sendo o primeiro construído apenas com o método dos elementos discretos formado por barras. (LDEM), o segundo somente com elementos finitos (FEM) e o terceiro é um modelo híbrido em que a metade na qual a ruptura que gera a emissão acústica acontece é modelada com LDEM e a outra metade com o FEM (ver Fig. 4).

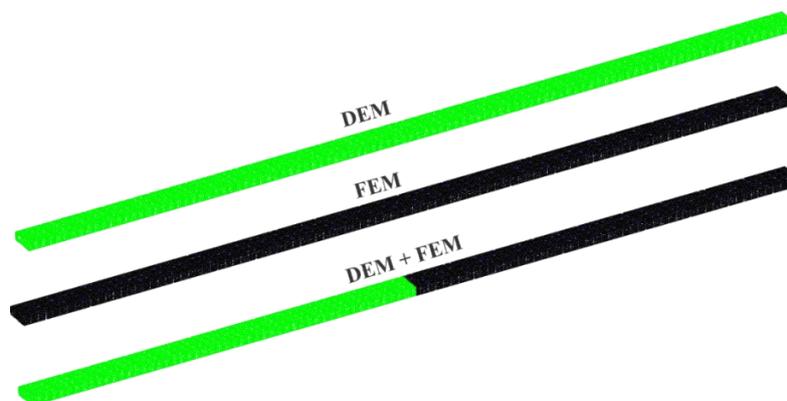


Figura 4 Três modelos elaborados para validar o acoplamento entre LDEM e FEM

Para os modelos híbridos aplicam-se duas formas de acoplamento (Fig. 5.a) dos modelos: (b) união realizada através dos nós das arestas dos módulos cúbicos e (c) união realizada nos nós internos dos módulos cúbicos. Na Fig. 5 detalhes na forma que foi realizado o acoplamento e apresentado. Num caso a união foi realizada vinculando os nós centrais do módulo cúbico, e no outro a vinculação do LDEM com o FEM e realizada nos nós das arestas dos módulos cúbicos do LDEM.

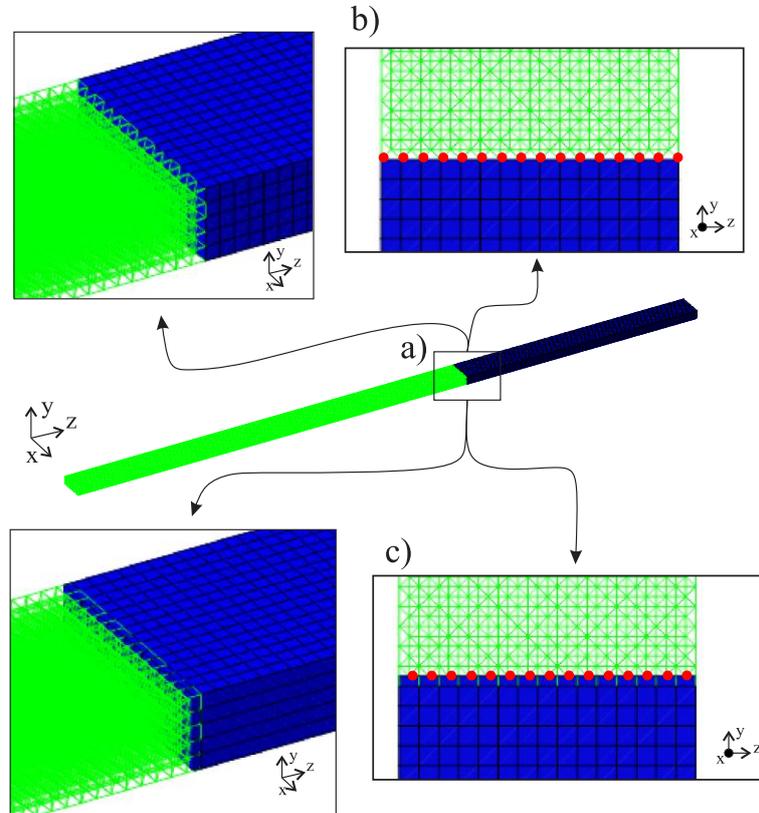


Figura 5 a) Modelos de união entre LDEM e FEM, sendo b) nos nós de aresta e c) nos nós internos.

2.3 Resultado da validação da modelagem mista.

A Fig. 6 mostra os resultados encontrados para o deslocamento na direção axial da guia de onda registrado no ponto de controle para os modelos LDEM, LDEM implementado no Abaqus, FEM e os dois tipos de modelos LDEM – FEM juntamente com o espectro das frequências para os resultados encontrados nas direções x e z. A direção y não foi mostrada pois os deslocamentos são desprezíveis se comparados com as outras direções (cerca de 1000 vezes menor). Pode-se constatar que os métodos são perfeitamente aplicáveis para o estudo de propagação de ondas elásticas, uma vez que, as respostas em termos de deslocamentos e frequências coincidiram.

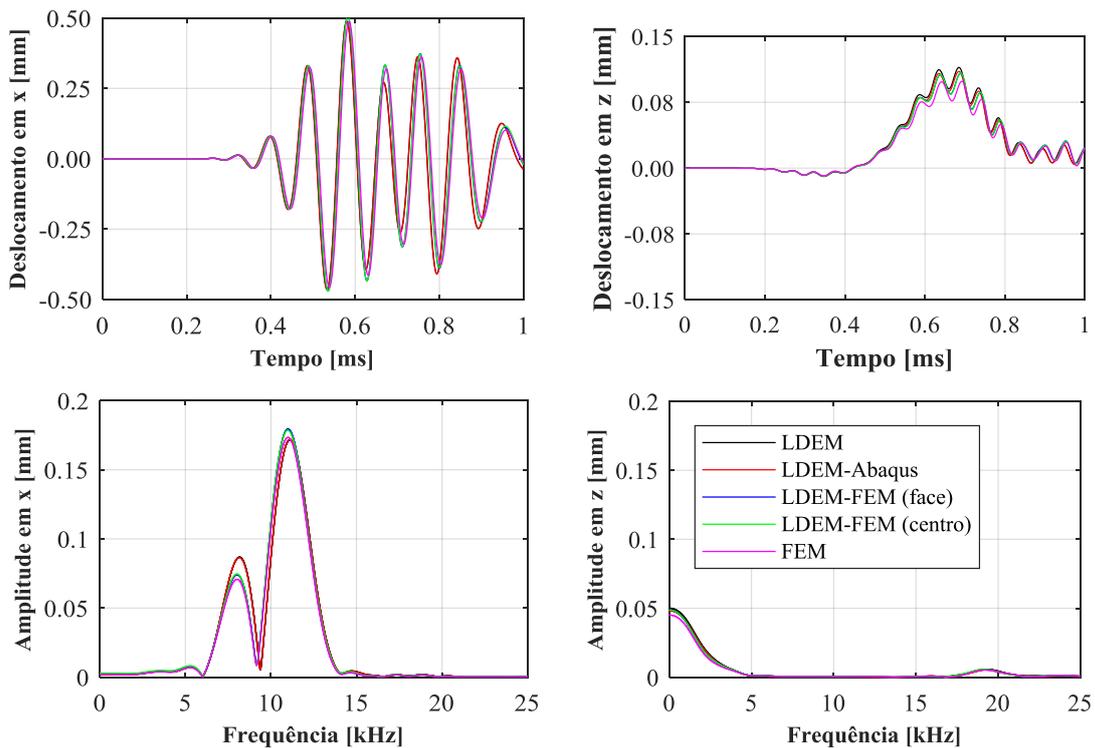


Figura 6 Respostas para o sinal em z e x no ponto de controle para os modelos LDEM, FEM e os dois tipos de modelos LDEM – FEM juntamente com o modelo em FEM.

3. APLICAÇÃO

Após a validação do modelo híbrido LDEM - MEF foram serão simulados três casos que consistem em gerar uma pre-fissura na região de LDEM e aplicar sobre ela esforços que simulem a propagação da mesma nos três modos clássicos de propagação que são ilustrados na Fig. 7.

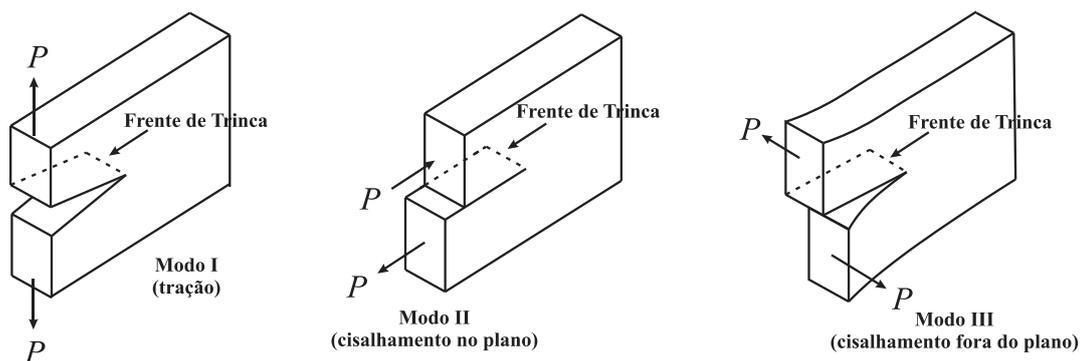


Figura 7 Modos de rompimento de uma trinca.

Na Fig. 8 se ilustram as três condições de contorno consideradas.

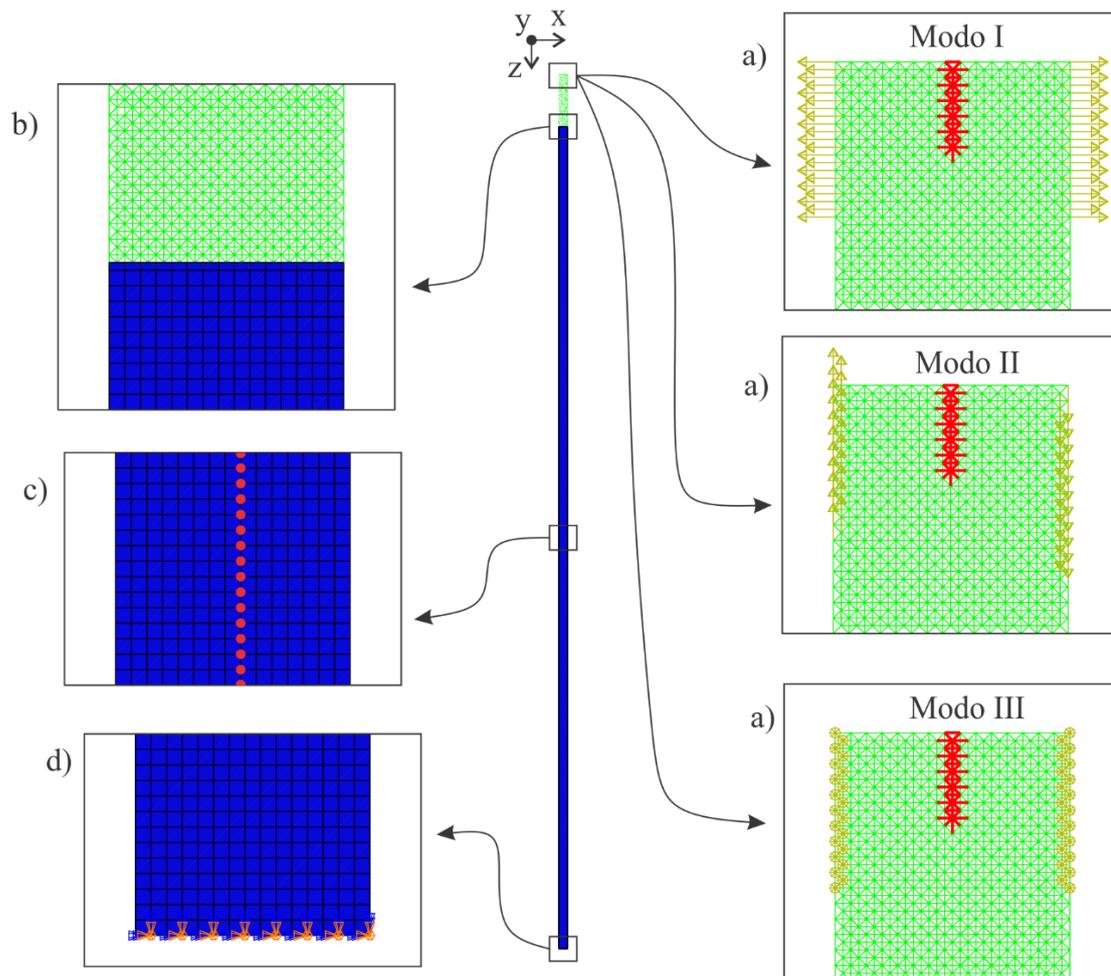


Figura 8 Modelo LDEM - FEM, onde as condições de contorno adotadas são apresentadas.

4. RESULTADOS

O monitoramento de uma linha de pontos espaçados de maneira equidistante na região central da haste (ver detalhe na Fig. 8.c) permite montar uma matriz com resultados onde as linhas da matriz representa uma coordenada na direção do z que determina a posição do nó no espaço e como colunas da matriz se terá os deslocamentos registrados em cada tempo.

Sobre esta matriz e possível aplicar a transformada de Fourier no domínio do tempo para obter o domínio em frequência, e aplicando a FFT no domínio espacial será possível obter resultados no domínio do número de onda. De esta forma no domínio frequência e número de onda é possível deixar em evidência como se distribuem as amplitudes das ondas que propagam na haste quando ondas elásticas emanam da ruptura interna simulada.

A Fig. 9, mostra o sinal capturado nas três direções ortogonais no ponto de controle indicado na Fig. 3. Neste caso a trinca está rompendo em Modo I e claramente o movimento longitudinal é o que apresenta um sinal de maior amplitude. O detalhe (b)

indica as ondas tipo P produzidas devido ao avanço da fissura. Agora serão analisadas as regiões com mais detalhes.

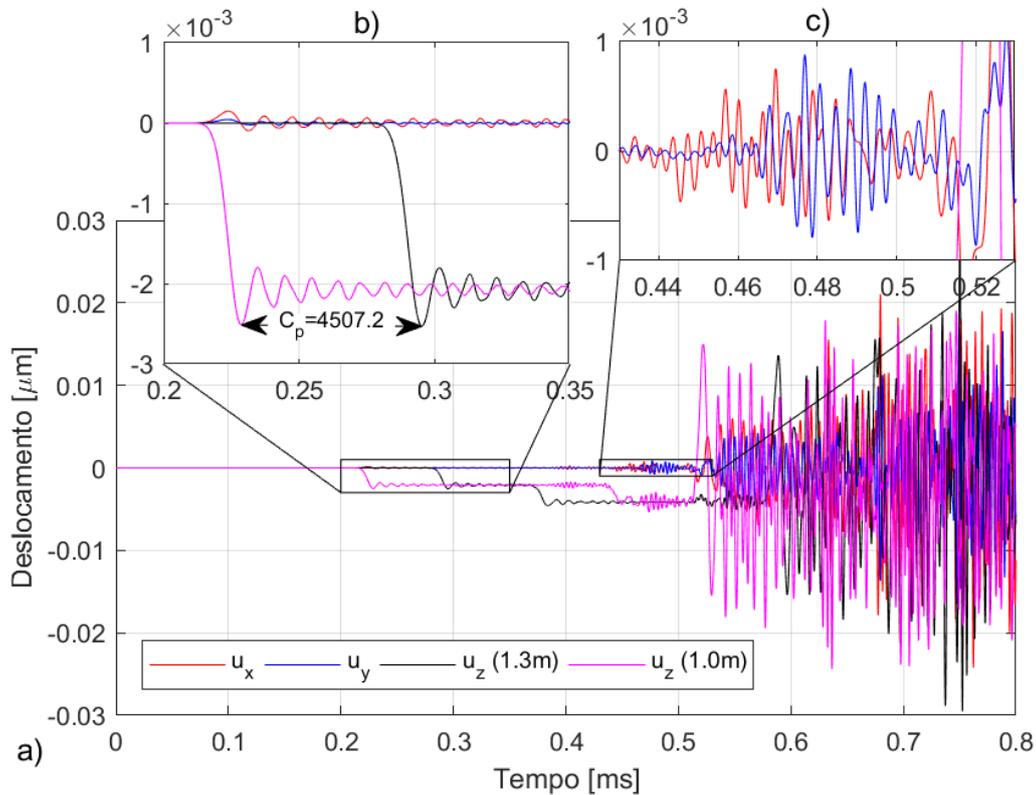


Figura 9 Sinal em um dos pontos de monitoramento, nos três sentidos.

Na , Fig. 9.b, se mostra a chegada de uma onda típica de compressão, os pontos estão a uma distância de 190 mm, com os tempos observados chega-se a velocidade de propagação desse pulso, que é de $v = \Delta d / \Delta t = 4507,2 \text{ m/s}$. Na Fig. 9.c mostra em detalhe a região 2, observa-se aqui um pacote de energia que aparentemente assume a forma de um modo de propagação específico essas informações podem ser úteis no projeto de sensores desenhados para capturar esse tipo de sinal.

A FFT (Fast Fourier Transform) do sinal coletado quando a prefissura propaga em Modo I, quando confrontada com as curvas de dispersão da guia de ondas (barra simulada) mostra que o modo principal da propagação é o longitudinal.

A Fig. 10 apresenta a propagação das ondas produzidas pela prefissura propagando em Modo I no domínio frequência, número de onda, superpondo este domínio com o domínio das curvas de dispersão. As curvas de dispersão mostradas no domínio frequência e número de onda foram obtidas através de métodos semi analíticos os quais são discutidos em detalhe em Groth et. al.(xxxx) .

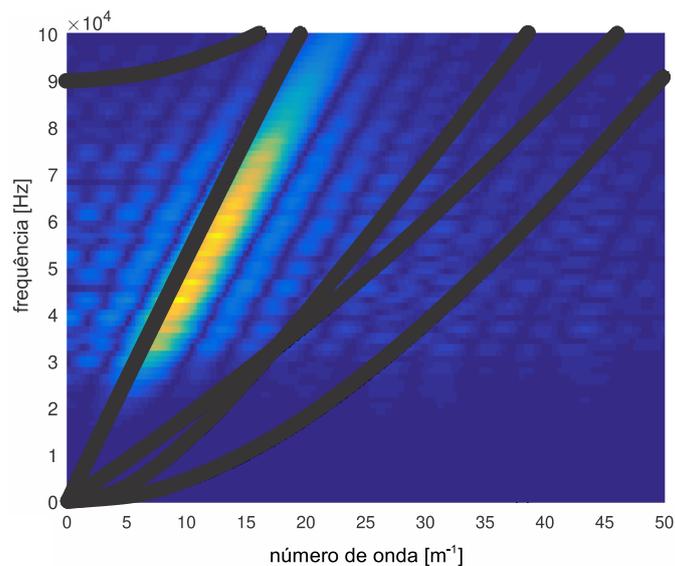


Figura 10 Transformada dupla dos deslocamentos no sentido de z.

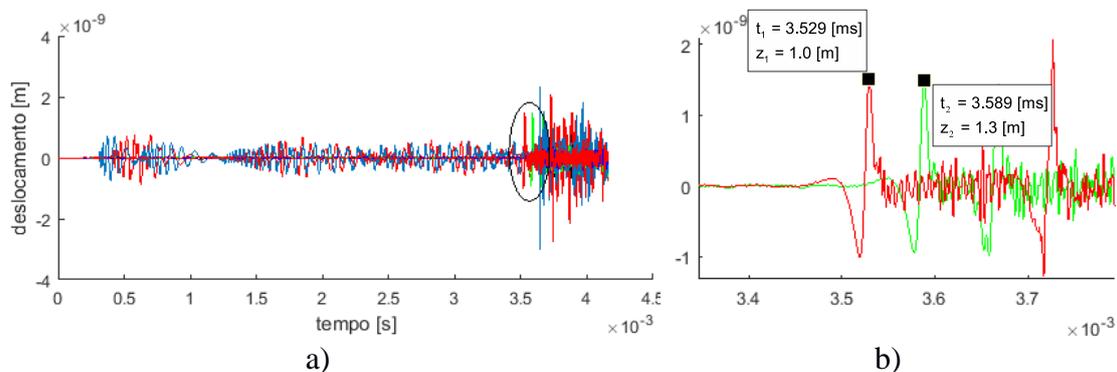


Figura 11 Análise do registro produzido quando a pre-fissura propaga em Modo II no ponto de controle (ver posição na Fig 3). Deslocamentos x (azul), y (vermelha) e z (verde) após tratamento do sinal (filtro janela 20 – 1500 kHz) a) vista geral dos registros, b) detalhe ampliado.

A Figura 11 apresenta a análise da onda que emana da prefissura propagando em Modo II. Na Fig. 11.a se observa preferencialmente movimentos nos sentidos x e y, indicando que a energia esteja propagando em movimento cisalhante, porém depois de certo avanço da trinca, um pulso na direção longitudinal é emitido, esse pulso é indicado como detalhe 4 na Fig.11.b ali é vista em detalhe a passagem do pulso por dois pontos de monitoramento distantes 300 mm entre si. Com os tempos de chegada em cada um dos pontos se chega a que a velocidade de propagação do pulso é de aprox. 5000 m/s, valor muito próximo ao da propagação das ondas P na haste metálica. Os resultados no domínio frequência vs número de onda são apresentados na Fig.12.a, mostrando que quem governa a propagação também no modo II e a propagação do modo longitudinal.

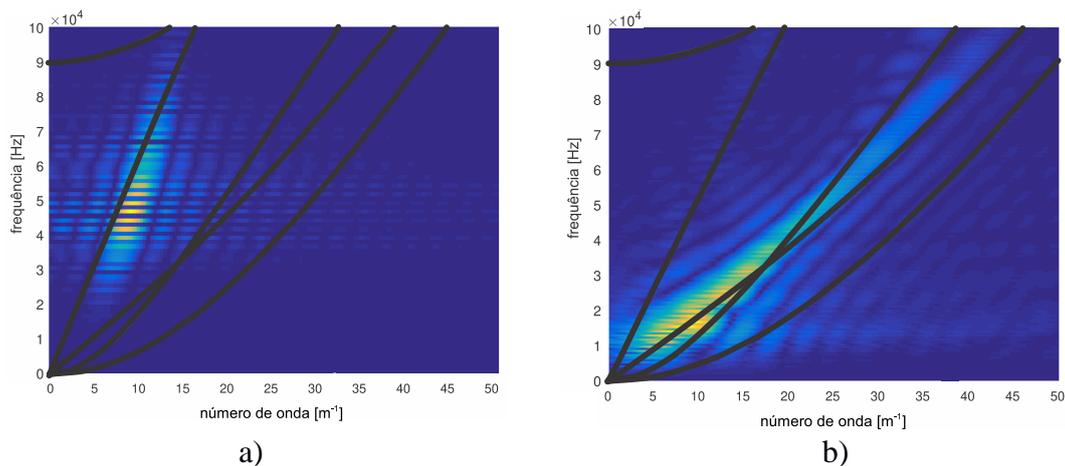


Figura 12 Resultados no domínio frequência número de onda (a), para propagação da prefissura em modo II, (b) propagação da prefissura em modo III.

A Fig. 12.b apresenta como se distribui a propagação do Modo III da prefissura. Vemos esta informação no domínio das curvas de dispersão frequência vs número de onda, se observa aqui que a maior parte da propagação o faz no modo torsional. Observamos que de baixo para acima as curvas de dispersão graficadas são a de flexão respeito do eixo de menor inercia, o modo de torsão, o modo de flexão respeito ao eixo de maior inercia e como modo mais rígido de interesse o modo axial.

5. CONCLUSÕES

No presente trabalho se apresentou uma metodologia para simular a propagação de uma prefissura submetida a modos clássicos de propagação. O modelo proposto utiliza o método dos elementos discretos que permite simular a ruptura no sólido conectado com um modelo de elementos finitos elástico linear. Uma verificação do modelo utilizado foi realizada e a consistência dos resultados foi ilustrada com um exemplo. A propagação da prefissura foi estudada dentro de uma haste metálica. Os resultados obtidos em termos de deslocamentos num ponto de controle e a captura de deslocamento sobre uma linha na superfície da haste são apresentados (estes últimos no domínio da frequência vs número de onda). Se comentam a continuação as conclusões obtidas ao realizar o trabalho:

- Poder realizar a interpretação das ondas cruzando a informação obtida no ponto de controle e a obtida no mesmo domínio das curvas de dispersão, se pode ver a característica de guia de ondas da estrutura estudada.
- Resulta interessante colocar a metodologia apresentada, no contexto de desenvolver sensores de emissão acústica para estruturas de geometrias específicas, que minimizem o ruído e maximizem a captura de eventos de emissão acústica.
- Cabe salientar também que uma verificação experimental sobre os resultados obtidos é mandatória para calibrar o modelo estudado com o tipo de informação que de fato poderá ser capturada num problema real.

REFERÊNCIAS

- Alleyne D., Cawley P., (1990) A two-dimensional Fourier transform method for the measurement of propagating multimode signals. *JASA* 89:1159-1168.
- American Society for Nondestructive Testing. (2005) *Nondestructive Testing Handbook: Acoustic Emission Testing*. Third Edition. Edição: Ronnie K. Miller, Eric v. K. Hill e Patrick O. Moore. Vol. 6.
- Birck, Gabriel, Ignacio Iturrioz, Giuseppe Lacidogna, e Alberto Carpintieri, (2016) “Damage process in heterogeneous materials analyzed by a lattice model simulation.” *Engineering Failure Analysis* 70: 157 - 176.
- Eagle D. M., (2005) *Fundamentals of Acoustic Emission Testing: Wave Propagation*. In: Moore P. O., et. al. *NDT Handbook* Vol. 6, 3 rd.
- Grosse, Christian, e Masayasu Ohtsu, (2008). *Acoustic Emission Testing*. Springer.
- Groth E. B., Iturrioz I., Kostas L. E., Birck G., Silva G. S., and Clarke T. G. R., (2016). Acoustical Emission propagation in a prismatic wave guided: Simulations using truss like discrete element method. *PROGRESS IN ACOUSTIC EMISSION XVIII*.
- Hillerborg, A., (1978). A model for fracture analysis. Cod LUTVDG/TV BM-3005/1-8.
- Kostaski, L. E., et al, (2015). “A lattice discrete element method to model the falling-weight impact test of PMMA specimens.” *International Journal of Impact Engineering* v130.
- Riera, J. D., (1984). Local effects in impact problems on concrete structures.
- Rose, J. L., (2014) *Ultrasonic guided waves in solid media*. Cambridge University Press, New York.

ACOUSTIC EMISSION MONITORING OF 16" PIPE SEGMENTS DURING HYDROSTATIC TESTING

Ricardo C. Jacques^a, Toni S. de Lima^a, Sérgio D. Soares^b, Thomas G.R. Clarke^a, Eduardo Groth^a

^a LAMEF, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, BRAZIL.

^b CENPES / PETROBRAS, Rio de Janeiro, BRAZIL.

e-mail: rjacques@demet.ufrgs.br

ABSTRACT

The structural assessment of pipelines is an important concern for the oil and gas industry, because component failure can lead to product loss, environmental disasters and risks of explosion. Acoustic emission (AE) is a non-destructive technique that can be used to inspect pipes without the need to stop operations and can even be used as a monitoring tool for the condition of the pipe over time. Evaluation of the data, however, is rather complex and requires experienced examiners and/or the use of pattern recognition techniques. These algorithms require a previous study of the relevant inputs/variables and this is the subject of this paper. Five pipe segments with a previous machined artificial crack were subject to a hydrostatic pressure test and were monitored by AE, Time of flight diffraction ultrasound and strain gages. Analysis of the data from all the techniques show the relevant parameters to be incorporated in future pattern recognition are: presence of high amplitude hits, sudden changes in accumulated hit count, high values for average frequency and high values for the Monpac criteria.

Keywords: pipelines, oil and gas, pattern recognition, Monpac criteria

1. INTRODUCCION

Acoustic Emission (AE) is an inspection technique that detects and analyzes the acoustic waves generated by the rapid release of elastic energy (Vallen et al, 2017). It has been extensively used for the testing and characterization of a wide range of structures and materials (Gallego et al, 2005, Chotickai P. 2001, Ono K. 2011, Dahmene F. 2015 and Clarke T. 2011), and is a suitable method for the inspection of metallic pressure vessels and pipelines. The non-intrusive nature of the method ensures that there is no need for product removal (gas/oil being transported) and that pipelines could be instrumented relatively simply, just by placing the sensors in the outer walls of the pipe and increasing the working pressure. In theory, if a defect grows as a response to the overpressure, or a leak is present, an acoustic wave will be emitted and could be detected by AE sensors, allowing the analysis and possible call for the shutdown of specific areas of interest.

There are some important perks to the technique, though, that must be accounted for. The sensors will respond (within their frequency response range) to any soundwave that reaches them, and they are subject to electrical noise and mechanical noise (which can take the form of raindrops, sand blown by the wind or heavy machinery being operated nearby). Some of those issues can be addressed by the use of filters (guard sensors and band-pass

filters), but the analysis of the data is not always simple, mainly because the data is unique and the same event can never be re-captured for further investigations.

Researchers have used different analysis and techniques to try to define if a component is safe for operation. Some of these include the association of cracking with amplitude distribution of the AE events (Ai et al, 2010), presence of higher values of average frequency (Chuluunbat T. 2015) (avg frq is defined as counts divided by duration) and count rate (Roberts et al, 2003 and Han et al, 2011)

Fowler (Fowler et al, 2003) presented an analysis, the Monpac criteria, that defines two variables (Severity and Historic Index) based on the energy of the acoustic signals acquired.

$$H(t) = \frac{N}{N-K} \left(\frac{\sum_{i=K+1}^N S_{oi}}{\sum_{i=1}^N S_{oi}} \right) \quad S_r = \frac{1}{10} \sum_{m=1}^{10} S_{om}$$

Where: H(t) = historic index at time t

N = number of hits up to and including time t

Soi = signal strength or MARSE of the *i*th hit

K=0 for $10 \leq N \leq 15$, $K=N-15$ for $16 \leq N \leq 75$, $K=0.8*N$ for $76 \leq N \leq 1000$ and $K=N-200$ for $N > 1000$. This parameter does not apply for $K < 10$. (Chotickai 2001).

Som = signal strength of the *m*th hit, where m is ordered from 1 (signal with largest energy) to 10 (signal with the 10th largest energy).

These variables are later plotted in a chart and are classified from A to E, where typically small values of H and S will only require notes for future inspections and high values will stop the test with a recommended NDT inspection.

There has also been a growing interest in the use of pattern recognition techniques and data classifiers such as clustering (Mori et al, 2003) and neural networks (Kumar et al, 2017) to provide information about structural integrity. One issue, according to Dahmene, is that the studies are being mostly focused on specimens, and are difficult to transpose to large scale structures because they have to account for attenuation, multiple reflections and noise among other factors. Although some work is being done on large vessels (Shen et al, 2000), we believe that this area should get more attention.

In order to address this issue, CENPES, LAMEF and COPPE/UFRJ worked together on a project to create a fail/pass criteria for the operation of pipelines based on the results provided by a Neural Network. The inputs used on the algorithm developed by COPPE are the acoustic emission data of a series of hydrostatic full scale tests of pipe segments that have been conducted by LAMEF. The tests are also monitored with Time of Flight Diffraction (ToFD) ultrasound and Strain Gages (SG) in order to provide a good overview of the underlying phenomena. This work presents some of the findings of the mentioned tests, along with some of the popular analysis for the EA data and the lessons learned from the experiments. The results for the neural networks are presented elsewhere.

2. METHODS OF EXPERIMENTAL DEVELOPMENT

The specimens tested were five segments of a 20inch X60 steel pipe, 14.5 mm thickness, that were cut to a length of 2m and had flanges with o-rings mounted on each side. Previous testing revealed that samples with a rather blunt tip (crack was machined by hand) and a 10/1 (width/depth) aspect ratio didn't exhibit crack growth, so we changed the geometry to a 20/1 ratio and had each sample undergo a fatigue run (loads between 10 and 100bar) in order to grow a sharp crack to a desired length between 8 and 11mm.

The hydrostatic test procedure consisted in two runs, in order to account for the Kaiser Effect and allow a better acoustic emission analysis in the second cycle that would be subject to less noise due to component relaxation. The samples were loaded in a ramp/plateau procedure with a pressurization rate of 2.5bar/min, four intermediate 10min plateaus at 50%, 62%, 77%, 87% of the maximum pressure and a final 1h plateau at 240bar. Sample E had a slightly longer plateau and a higher final pressure for the second cycle because we noticed that the crack was propagating slowly.

Monitoring of the crack size (center area) was done with a ToFD equipment, acrylic wedges from Panametrics model ST1-60L and a Panametrics transducer (10MHz and a crystal diameter of 6mm) model C544-SM ST1. Comparison of crack depth between ToFD and fracture analysis revealed a 5% error in measurements made with ToFD (aprox. 0.5mm). The deformation of the area near the edges of the crack was measured with two Strain Gages (SG).

The Acoustic emission data was obtained through the use of a Disp 16C from PAC and 8 R15I resonant sensors with integrated 40 dB amplifiers. Some sensors were mounted near the flanges to act as guard-sensors and allow filtering of acoustic signals from sources unrelated to the crack (Figure 1). The AE equipment recorded hits that were higher than a threshold of 45dB and that agreed to a 10-400kHz band pass filter.

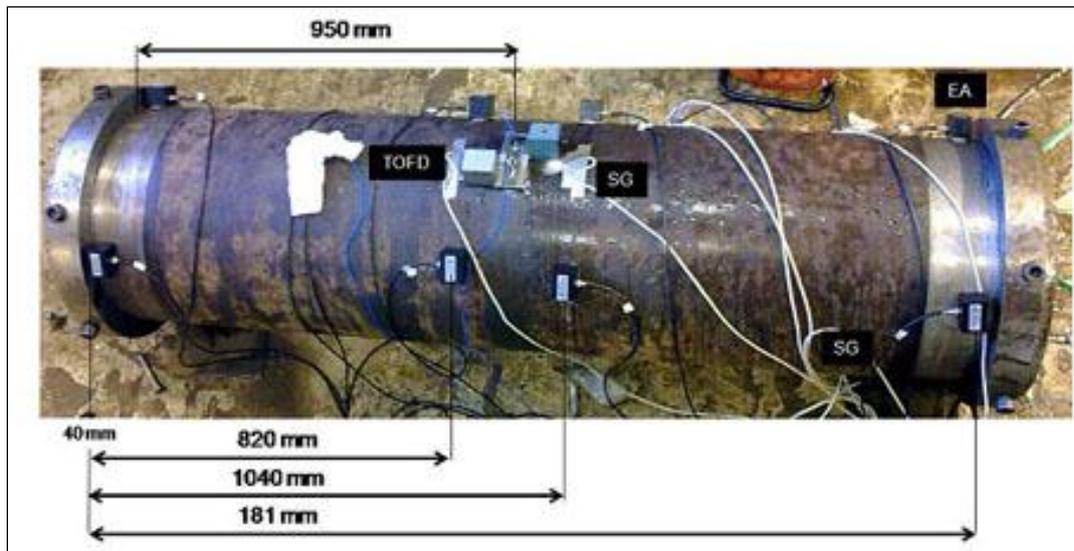


Figure 1: Ver com o Toni se ele não tem uma figura melhor

3. RESULTS

An overview of the tests can be seen in Table 1. Four out of the five tests were successfully monitored both with EA, SG and ToFD, with the sample collapsing to overload at the maximum pressure of the test. Samples A, C, D and E all failed at a similar pressures and defect size, as expected, since they were all taken from the same pipe.

Table 1: Overview of the hydrostatic tests

Sample	Flaw Size(mm)			Burst Pressure (bar)	Notes
	*	Initial	Final		
A	E	8.1	13.6	235	Burst during the first cycle
B	I	7.6	-	-	Delamination made impossible monitoring with ToFD. Sample didn't burst at final Pressure.
C	E	10.6	13.1	237	Minor delamination on the edges of the crack
D	I	10.2	12.8	238	Lots of noise from unknown source
E	E	8	13.3	249	3 cycles were conducted because the pressure failed to reach goal on the first cycle due to a leak in the o-ring seals.

* E = External; I=Internal.

In the case of sample B, the ultrasonic ToFD signal presented an abnormal behavior during fatigue and that prevented us from measuring the crack size. The hydrostatic test was still conducted and the sample didn't break at the highest pressure (AE was still recorded but is not presented in this paper because we cannot correlate it with the defect sizing). Later fracture analysis of sample B showed the presence of considerable delamination of the sample (Figure 2b).

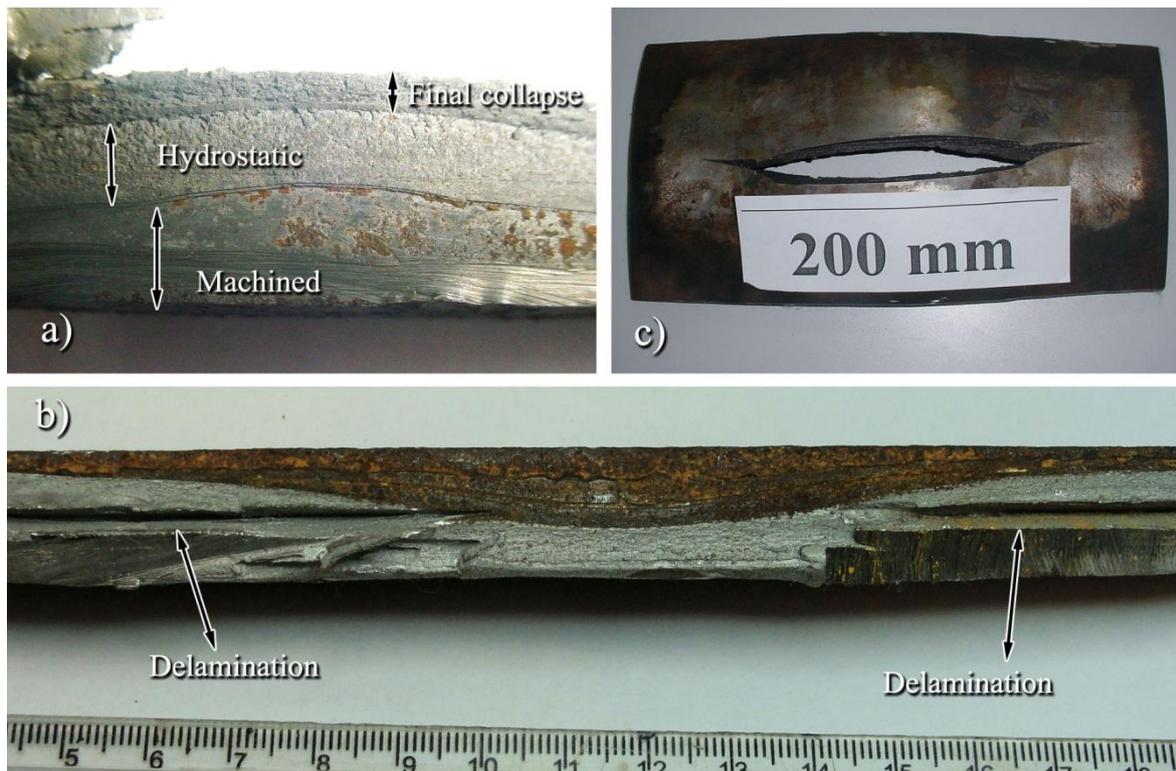


Figure 2: a) Fracture surface of sample A; b) Fracture surface of sample B showing delamination on the sides of the crack; c) central region of sample D after burst.

The delamination took the form of a crack in the middle of the wall that ran parallel to the outer surface of the pipe and probably changed the sonic path of the ToFD transducer. Figure 2 also shows the crack surface after the testing with the distinct separation of the zones where the initial defect was hand machined the zone where the crack grew during the hydrostatic test and zone of the final collapse to overload.

The data from the acoustic emission testing had to be filtered in order to separate acoustic waves associated with crack growth from other sources. In order to do that, we looked at the events that were first caught by a guard sensor, followed by the sensors that were near the crack and ultimately by the guard sensor on the other side of the sample and calculated a time difference between the first and last hit. All the hits that were thus first acquired by a guard sensor and later acquired by the other sensors within a time interval of 1.5ms were removed because they were associated with events that were generated near the flanges.

In some cases we had to remove from the analysis the data acquired from a sensor that was placed near the crack because the sensor was continuously acquiring hits (1hit/s) with up to 50dB amplitude that had the same repetition rate as the ToFD pulser (1pulse/s). These hits also had very similar values of Energy and Duration and were associated with the ToFD equipment. Although the major response of the ToFD transducer was 10 MHz and we were using bandpass filters in the AE equipment, the impulse signal sent to the transducer probably excited some side bands that were in the range of the AE sensors. Only one or two EA sensors suffered from this problem on each run. We believe that the

geometric configuration of the other sensors ensured that the ToFD signals were attenuated to levels below the AE threshold and were not acknowledged as hits.

Figure 3 shows the result of the first cycle of the loading of sample E that couldn't be finished because the sealing o-rings in the flanges failed at a pressure of 225bar around a time of 8000s. The leak was confirmed by the presence of water in the outside of the sample and could be earlier determined by a drop in the pressure and a large number of AE hits with 75+dB of amplitude, saturated Duration and saturated Counts. We have, thus, confirmed that AE can be used as a leak detector as reported in the literature (Miller et al, 199). Crack growth was minimum at this cycle and was disregarded (0.5mm is within the error of the ToFD system). This result required the team to make a second run in order to achieve the maximum pressure and effectively make a first cycle (account for Kaiser effect) and a third run where the analysis was conducted, which was considered the second cycle..

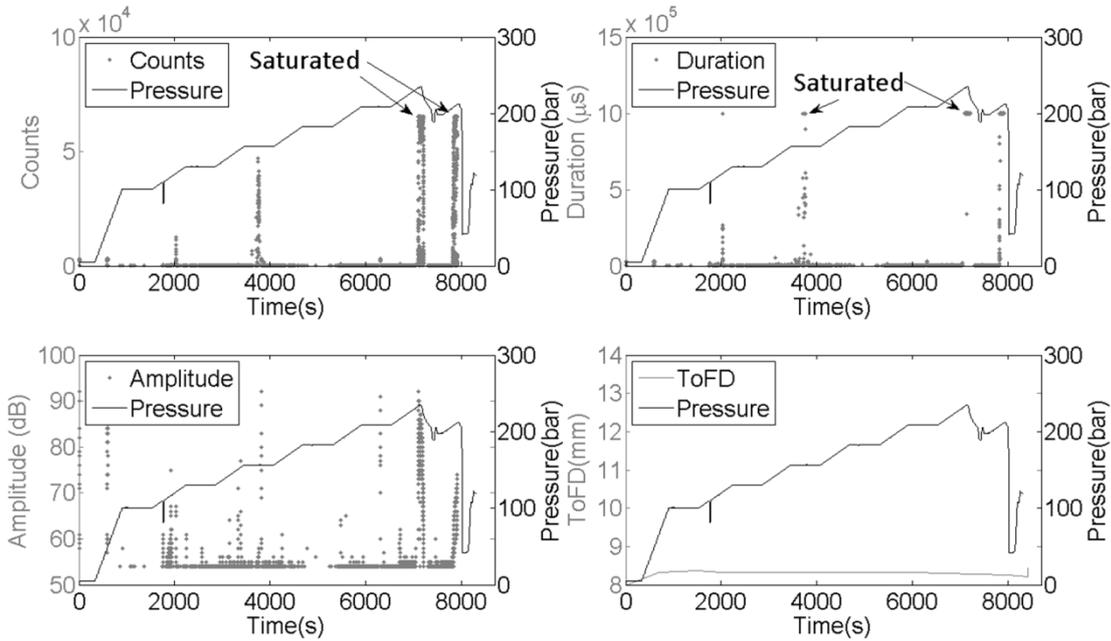


Figure 3 –EA and ToFD for the first cycle of Sample E where a leak was found

Figure 4 shows the results of the cycle where the crack reached a critical level and each sample failed to collapse. This happened on the first cycle for Sample A, second cycle for Samples C and D and on the third cycle for Sample E. We are focusing the analysis mostly on these cycles because they are the cycles where the cracks presented a major growth and also in an attempt to have the EA data be less subject to noise from residual stresses relaxation and o-ring accommodation. Sample C is the only one that showed what could be considered crack growth (2mm) during the first cycle.

The crack from Sample A started to grow at 3100s and we can see the presence of higher amplitude hits (65+dB). There is a large increase in crack size at 5100s and we can see a change in the pattern of the deformation measured by the strain gages. The sudden

drops in deformation at 7000 and 8300s happened because the strain gages got detached from the sample (adhesive failure of the glue). We cannot see an evident change of pattern for accumulated number of hits until moments before the final rupture where a sharp increase was presented and also the presence of high amplitude hits moments before the final burst of the sample.

Sample C showed some hits with very high amplitudes (90+dB) that could not be correlated to crack growth at a time of 650s. They might be the result of the minor delamination found at the sides of the crack (similar to Figure 2b but in a smaller scale), or crack growth in a region that was not being inspected by the ToFD transducers. For the rest of the test we can see a good correlation between hits and crack size and also SG and crack size.

Sample D shows a lot of hits which are regularly repeated at amplitude of 50-60dB, most noticeably after 3500s where a 99dB hit was captured. We could not determine the source of these events/noise but we can see that apparently they follow the pattern of the deformation measured by the strain gages (amplitudes increase as the deformation increases). Our guess is that it is either associated with the ToFD pulses (although the time of repetition is a bit off) or maybe a turbulent flux happening inside the sample at the crack (this sample had the crack machined from the inside). Again, there was a good correlation of the SG and the crack size.

Sample E didn't present significant acoustic activity up to a time of 8000s, where we can see the presence of large amplitude hits and the start of the crack growth. This happened at the maximum pressure plateau, and we decided to increase the time of the plateau because we could see that the crack was growing slow and steadily with the ToFD. We can see a good agreement between the strain gages and ToFD, a reasonable agreement between accumulated hits and crack size and the presence of high amplitude hits moments before the final burst.

Figure 5 shows the results for average frequency and Monpac criteria. The Monpac is calculated per channel, so we present the most alarmed (the one that reached highest value first) and most relaxed channel. The other channels fell in the range between them.

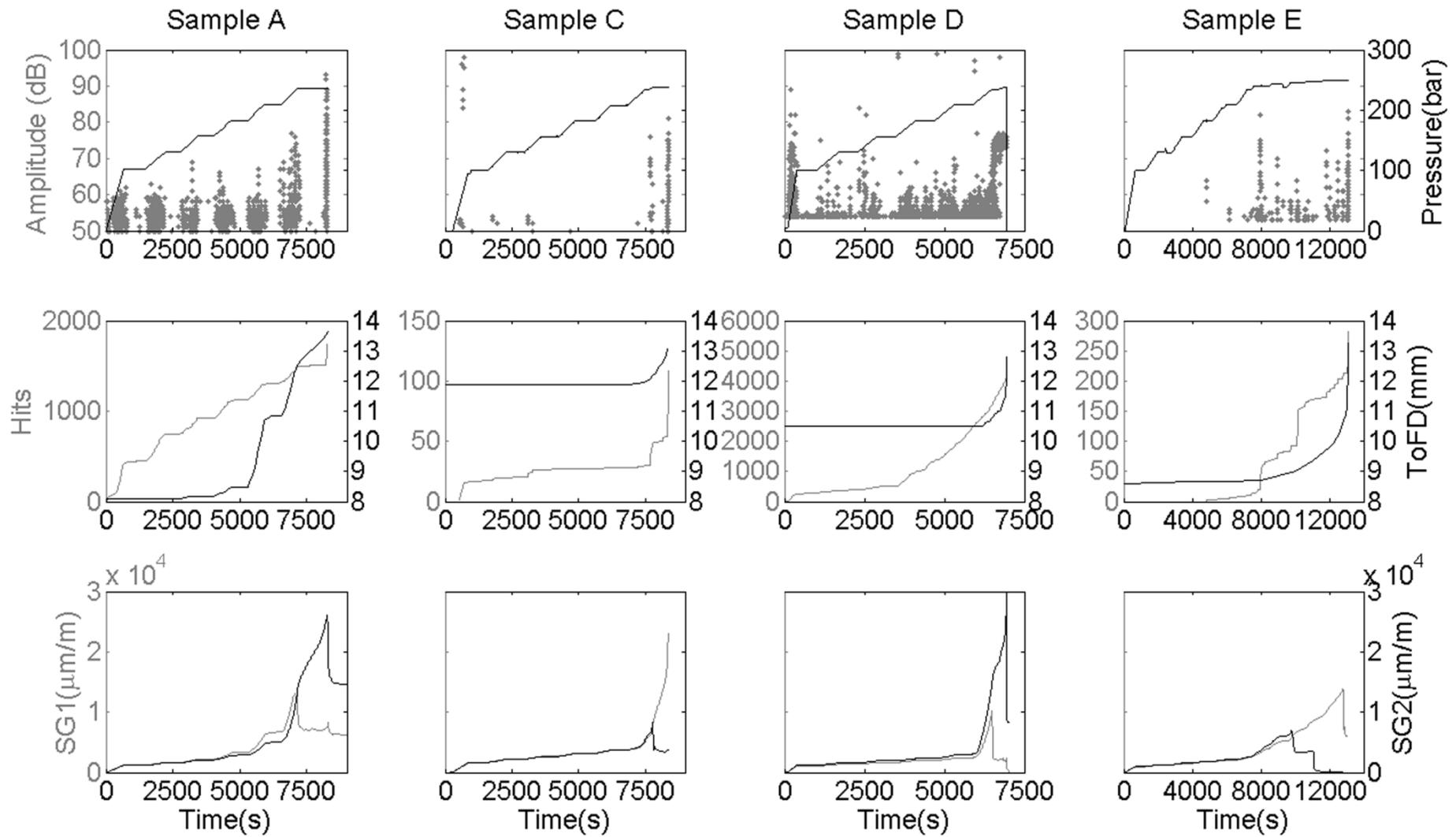


Figure 4: Results from ToFD, SG and some AE parameters for the samples tested

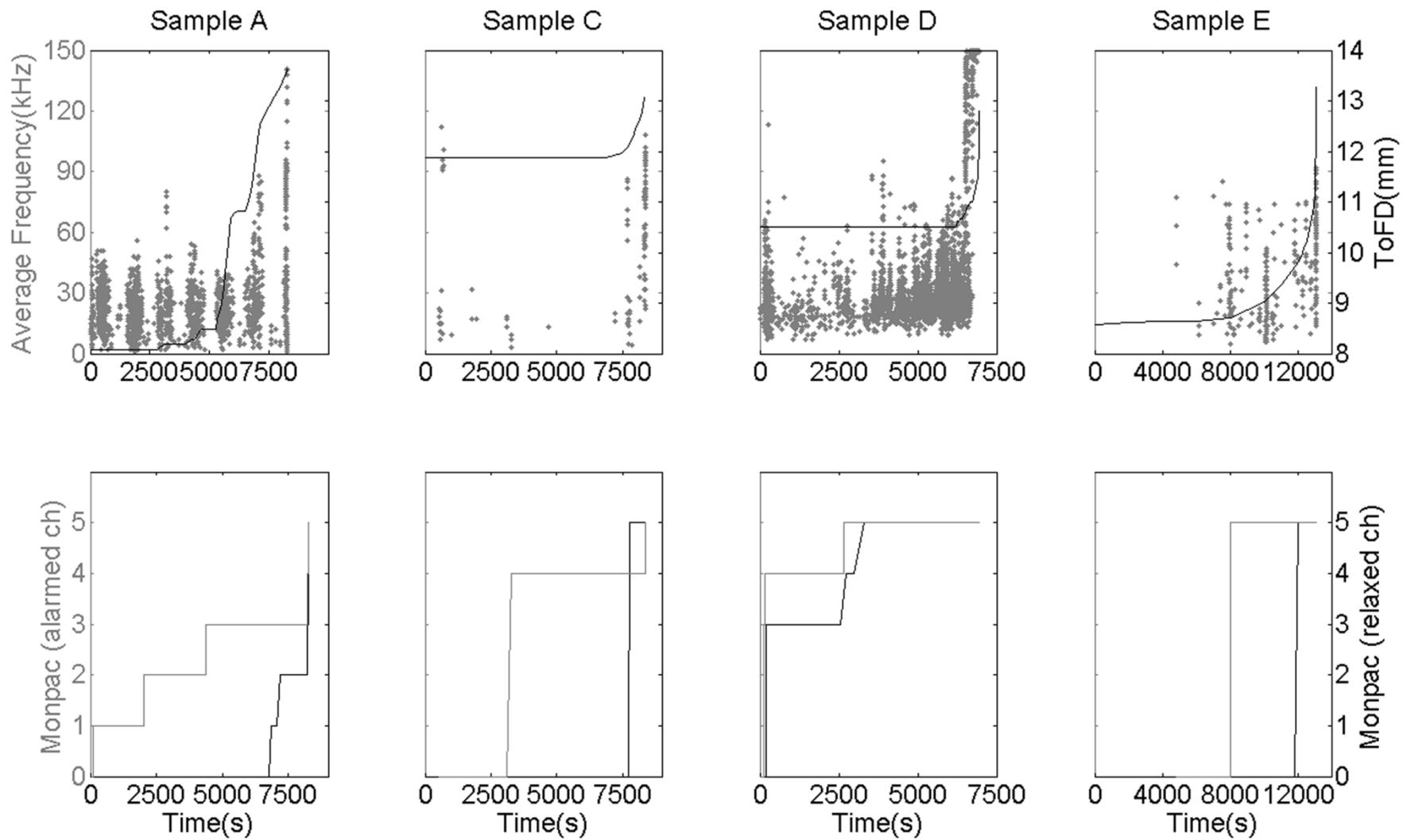


Figure 5: Average Frequency and Monpac criteria for all samples in the cycle that burst

Analyzing the average frequency, we see a tendency of hits with more than 65kHz appearing as the crack starts to grow (mostly accurate for sample A and E). There are some ‘false calls’ for sample C and D at the beginning of the test, but we see for sample D that the avg frq also increases as the crack increases, which lead us to believe that most of those hits are indeed related to the crack growing (see also results and discussion for amplitude in Figure 4).

For the Monpac criteria, we numbered the levels from 1 to 5 instead of classifying from A to E. If the sample reaches zone C, level 3 in our case, the procedure indicated the presence of defects and requires a follow up inspection with another NDT technique. Although we cannot see a good correlation between the Monpac and the crack size, all samples reached what we consider to be the stop criteria for the test, level 3 or type “C”.

Although it is a popular analysis in the literature, in general the accumulated number of counts was not better correlated to the crack growth than the accumulated number of hits for our tests. In fact, on some occasions (Sample C and D), it had a significant lower correlation, as shown in Table 2 below.

Table 2: Cross Correlation between chosen parameter and crack size

AE Parameter	R ²			
	Sample A Crack	Sample C Crack	Sample D Crack	Sample E Crack
Ac. Hits	0,83	0,80	0,73	0,89
Ac. Counts	0,88	0,66	0,50	0,84

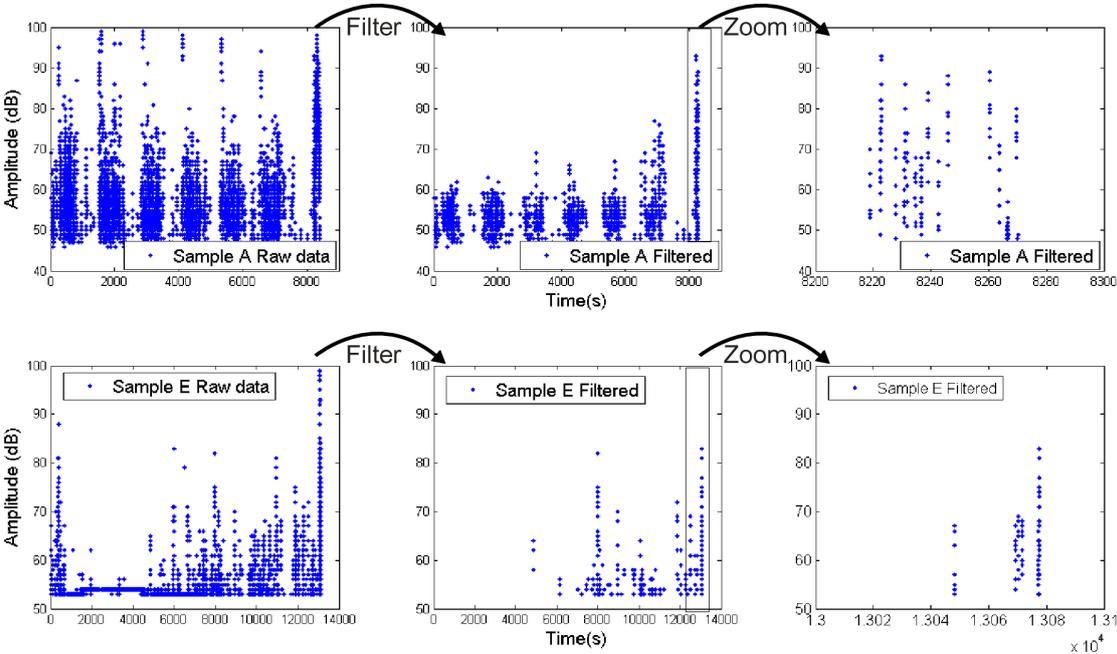


Figure 6: AE data from samples A and E; as acquired (raw), after the filter, and a zoom of the last 100s of the test.

For both samples, a lot of high amplitude hits were excluded for being associated with noise from the flange area. We can see that sample A presented a large number of high amplitude hits (75+ db) in the last 100s and that sample E had fewer hits generally with lower amplitudes. If we look at Figures 3 and 4, we can see that the crack grew faster for sample A (during load and also during the final plateau) while for sample E, it grew at a slower rate and mostly at the plateau. The apparent absence of hits for sample E is probably connected to the difficulty of detecting slow growing ductile cracks, as reported by Scruby and Wadley (Scruby and Wadley, 1982).

4. CONCLUSIONS

The majority of the tests were run and were successfully monitored with the suggested techniques, with the data being collected and transferred to the other partners in the project. We have found that filtering the data for noise is absolutely necessary in order to conduct the analysis and apply the pass/fail criteria. The parameters that showed the best results and should be implemented in the neural network are as follows: high amplitude hits and saturated duration/counts (when searching for leaks), presence of high amplitude hits, sudden changes of behavior in accumulated hits and increase of average frequency and Monpac criteria.

We would like to remark that although we tested similar samples with similar cracks, we had very different behaviors regarding the acoustic data. While it was clear for sample A that the pipe would fail, this information only came at a later stage for sample E. We advise caution for the teams running inspections, especially in the case of slow growing ductile cracks.

REFERENCES

- Vallen, H. AE Testing Fundamentals, Equipment, Applications. The e-Journal of Nondestructive Testing, September 2002 • Issue Vol. 7 No. 9. [Accessed 17/02/2017]. <http://www.ndt.net/article/v07n09/05/05.htm>
- Gallego, A. et al. Coating adherence in galvanized steel assessed by acoustic emission wavelet analysis. Scripta Materialia 52, p. 1069–1074; 2005. doi:10.1016/j.scriptamat.2005.01.037
- Chotickai, P. Acoustic emission monitoring of prestressed bridge girders with premature concrete deterioration. Master Thesis, University of Texas at Austin. 2001.
- Ono, K. Application of acoustic emission for structure diagnosis. DIAGNOSTYKA – Diagnostics and structural health monitoring 2(58), p.3-18; 2011.
- Dahmene, F. Acoustic Emission of Composites Structures: Story, Success, and Challenges. Physics Procedia 70, p. 599 – 603; 2015 . doi: 10.1016/j.phpro.2015.08.031.
- Clarke, T. Monitoring the structural integrity of a flexible riser during a full-scale fatigue test. Engineering Structures 33, p. 1181–1186; 2011. doi:10.1016/j.engstruct.2010.12.039.

- Ai, Q. et al. Acoustic emission of fatigue crack in pressure pipe under cyclic pressure. *Nuclear Engineering and Design* 240, p. 3616-3620; 2010.
doi:10.1016/j.nucengdes.2010.05.022
- Chuluunbat, T. Application of acoustic emission monitoring to pipeline fracture tests. Doctor Thesis. University of Wollongong, Australia; 2015
- Roberts, T.M. and Talebzadeh, M. Fatigue life prediction based on crack propagation and acoustic emission count rates. *Journal of Constructional Steel Research* 59, p.679-694; 2003. doi:10.1016/S0143-974X(02)00065-2
- Han, Z. et al. Acoustic emission during fatigue crack propagation in a micro-alloyed steel and welds. *Materials Science and Engineering A* 528, p. 7751-7756; 2011.
doi:10.1016/j.msea.2011.06.065
- Fowler, T. J. et al. The MONPAC System. *Journal of Acoustic Emission* vol 8 no.3, p.1-8; 1989.
- Mori, Y. et al. New Concept of AE Standard: JIS Z 2342-2002 “Method for acoustic emission testing of pressure vessels during pressure tests and classification of test results. *Journal of Acoustic Emission* 21, p.197-205; 2003.
- Kumar, C. S. et al. Failure strength prediction of glass/epoxy composite laminates from acoustic emission parameters using artificial neural network. *Applied Acoustics* 115, p. 32–41; 2017. <http://dx.doi.org/10.1016/j.apacoust.2016.08.013>
- Shen, G. et al. The Investigation of Artificial Neural Network Pattern Recognition of Acoustic Emission Signals for Pressure Vessel. 15th WCNDT, Roma 2000. [Accessed 20/02/2017]. <http://www.ndt.net/article/wcndt00/papers/idn438/idn438.htm>
- Miller, R. K. et al. A reference standard for the development of acoustic emission pipeline leak detection techniques. *NDT&E International* 32, p. 1–8; 1999.
- Scruby, C. B. and Wadley, H.N.G.. An assessment of acoustic emission for nuclear pressure vessel monitoring. *Progress in Nuclear Energy*, vol 11, No.3, p.275-297; 1982.

ANALISIS DE VIBRACIONES EN UNA CAJA REDUCTORA DE UNA TURBINA

Klempnow. A. ^a, Piñeyro J. J. ^a, Bello A. ^a y Palmieri F. ^b

^a Grupo Vibraciones Mecánicas, UTN Facultad Regional Delta, Campana, ARGENTINA

^b Grupo Vibraciones Mecánicas, UTN Facultad Regional San Nicolás, ARGENTINA

e-mail: andreas.klempnow@gmail.com

RESUMEN

Las turbinas a gas pequeñas y medianas hasta unos 60 MW de potencia para la generación de energía eléctrica funcionan a velocidades del orden de las 5000 RPM esto requiere que se instalen cajas reductoras para llevar la velocidad de salida al giro del generador en 3000 RPM, en el caso de Argentina donde la frecuencia es de 50Hz, en otros países con frecuencia de 60Hz se cambia la relación de engrane para adecuar a la velocidad requerida en el generador. Se encontró en algunas de estas cajas reductoras variaciones importantes de las aceleraciones en el sistema de monitoreo continuo por los engranajes, los valores a aceleraciones llegan por pocos segundos a los niveles de alarma y en algunos casos al nivel de disparo que genera la parada preventiva de la máquina. Estas vibraciones se detectan en la frecuencia de engrane y en la segunda armónica de engrane. Las inspecciones visuales de los dientes de los engranajes no indican falla importante más allá del desgaste normal después de 20 años de uso. Los aumentos temporarios se relacionan con las variaciones de potencia del generador y leves fluctuaciones de la frecuencia de la red interconectada atribuible a las condiciones operativas del generador y de su centro magnético. Se aplicaron distintas técnicas para el diagnóstico del estado de los engranajes como el Espectro, Señal temporal, Cepstrum, análisis de tiempo-frecuencia.

Palabras Clave: Vibraciones, Reductor, Turbina a gas, Centro magnético, Espectrograma.

1. INTRODUCCIÓN

La caja reductora de la turbina a gas de generación eléctrica de 45 MW es de dos ejes horizontales con la entrada a 5420 RPM y salida a 3000 RPM conectada al generador con acople rígido, está montada en cojinetes de fricción de metal blanco. Los engranajes son doble helicoidal o tipo chevron “ver fig. 1” por lo cual los dientes se autocentran por la fuerza transmitida.

La Turbina cuenta con un sistema de monitoreo continuo Bently Nevada 3300 con sensores de proximidad en los cojinetes de la turbina y del generador y un módulo de medición de aceleración y velocidad con un acelerómetro type 330400 de 100 mV/g en el eje de entrada del reductor en dirección horizontal para controlar las vibraciones de la caja reductora.

El sentido de giro es antihorario en el piñón de 67 dientes visto desde la turbina y la corona de salida de 121 dientes gira en sentido horario. La fuerza de engrane hace que el piñón se carga en la parte inferior de los cojinetes y la corona se apoye en la parte superior de los cojinetes “ver fig. 1” levantándose unas décimas de milímetro del juego de los cojinetes, dado que la fuerza de engrane (Eisenmann R.1998) alcanza los 400kN muy superior al peso de la corona. La inspección visual de los engranajes indica un buen estado sin desgaste, salvo lo propio después de 20 años de funcionamiento normal.

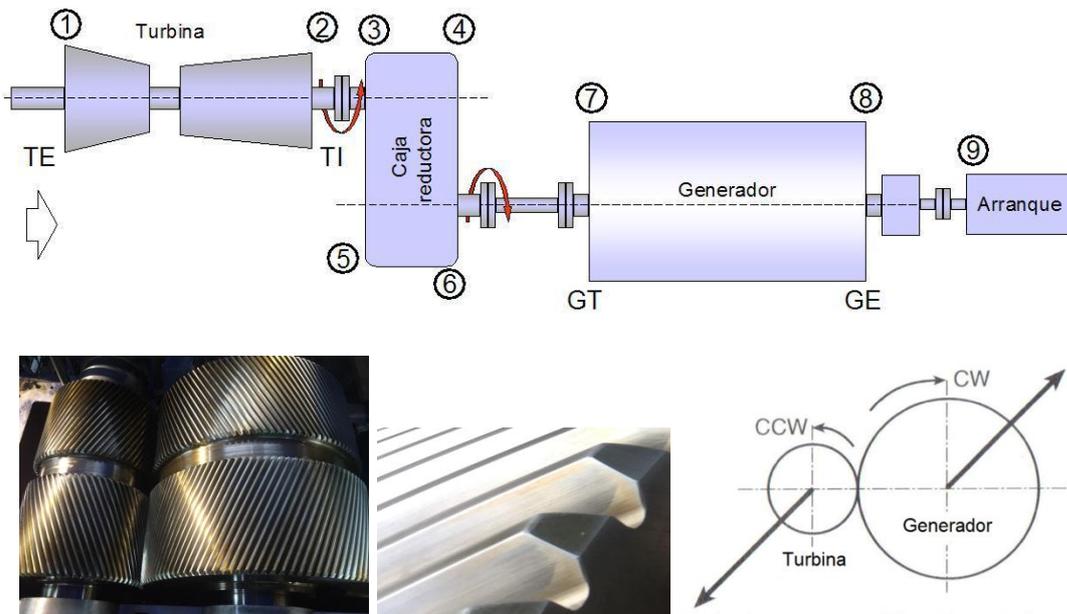


Figura 1 Esquema de la turbina con su caja reductora y generador. Engranajes doble helicoidal, fuerzas de engrane.

La posición axial de toda la máquina Turbina, Reductor y Generador está dada por un cojinete axial en la turbina lado admisión. Este cojinete posiciona a los alabes de la turbina y a través de la caja reductora doble helicoidal define la posición axial del generador.

2. MEDICIONES DE VIBRACIONES Y RPM

Se realizó una serie de mediciones del reductor de la turbina a gas debido que se registraron periódicamente picos de aceleraciones en el sistema de control de la planta, que en algunos casos llega al nivel de alarma y en otros al nivel de disparo que producía la salida de servicio de la unidad en forma preventiva.

Los puntos de medición son:

- Acelerómetro de la caja reductora, en aceleración
- Fase de la turbina
- Fase del generador

El gráfico de tendencia presenta un tramo de las vibraciones en aceleración y las RPM de la Turbina en el lapso de unos 10 minutos “ver Fig. 2”, los picos de aceleraciones se

dan cuando la velocidad de la turbina bajas de unos 5412 RPM (esto es cuando la frecuencia de la red cae a 49,95 Hz o menos) y tiene cambios de aceleración o desaceleración. Los picos de aceleración que alcanzan los 8 g pk se producen cuando la velocidad de la máquina se reduce por el sistema interconectado y esto hace que se incremente la potencia generada por algunos segundos entre 4 y 10 segundos, luego cuando la frecuencia se recupera la turbina se descarga bajando su potencia y vuelve a producir un pico de aceleraciones, la frecuencia registrada del sistema era de entre 50,13 y 49,94 Hz. Cabe aclarar que estas máquinas tienen una regulación primaria y secundaria de frecuencia RSF normalmente del 5% de su capacidad esto significa que siempre tiene una potencia de reserva del 5% para adecuarse a cambios del sistema interconectado.

Se supone que en estas condiciones la turbina aumenta o reduce su carga y genera una descompensación de los esfuerzos en la caja reductora y por lo tanto de la pisada de los dientes.

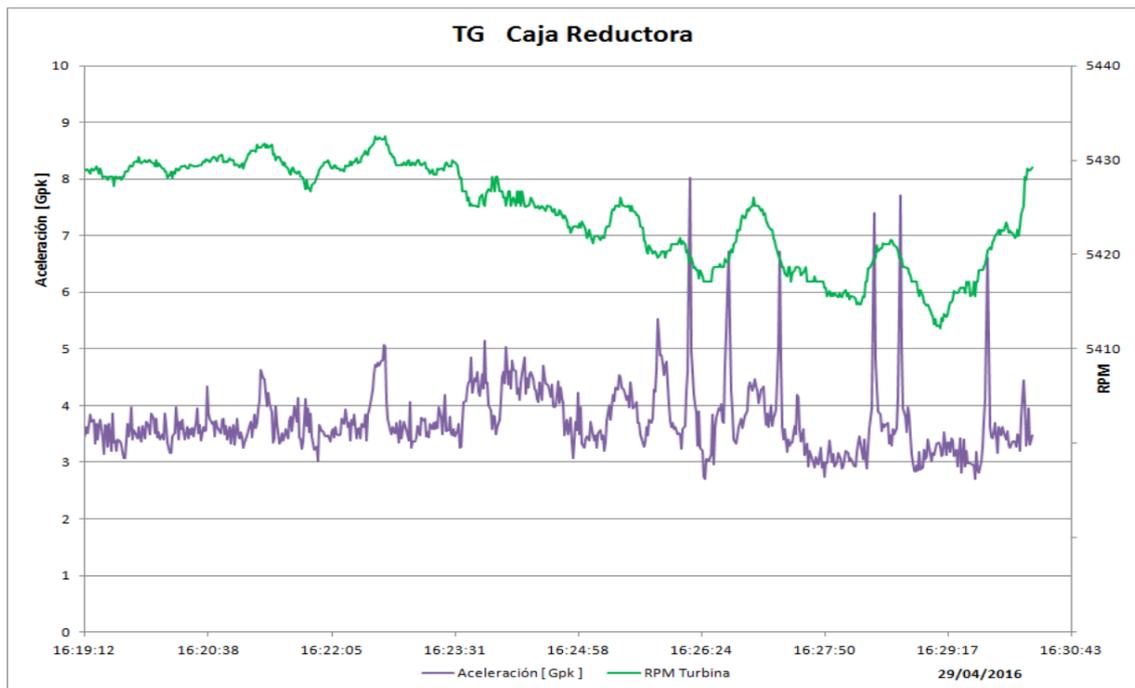


Figura 2 Tendencia de Aceleración de la caja y las RPM en condiciones anormales.

El primer diagnóstico se centró en excesivo juego en los cojinetes de la caja reductora, esto se descartó luego de la medición de juegos que dio normal dentro de los valores aceptables. La segunda teoría fue un empuje producido por el generador ante variaciones de la frecuencia del sistema interconectado y por ende de la carga de la máquina. Esto se debe a la posición axial del rotor de generador que esta fuera levemente de su centro magnético. El generador tiene una marca de referencia para la alineación que debe indicar esta posición del centro magnético, pero después de varios mantenimientos y desarmes esta referencia esta dañada y no es confiable que esté correcta. En condiciones de variaciones de carga el empuje del rotor hace que los engranajes doble helicoidales se carguen más en una de las dos ruedas y provocan el aumento de las aceleraciones por un corto tiempo hasta que se normaliza la carga.

3. SEÑALES TEMPORALES Y ESPECTROS

En condiciones normales de funcionamiento las aceleraciones de la caja reductora son de unos 1,45 g RMS y del orden de los 4 g pk “ver Fig. 3”, esto es aceleración en [g] pico real, en la estimación de falla de un sistema como un reductor se toma las aceleraciones RMS (o valor eficaz) porque indican la energía de la vibración, en otros sistema de control se toman las aceleraciones pico porque indica los golpes en la máquina por eso se suele utilizar las aceleraciones en [g] pico, se muestran en estos gráficos porque el sistema de monitoreo de la turbina registra las aceleraciones pico.

En condiciones de bajas aceleraciones el espectro tiene la frecuencia de engrane de 6050 Hz (engranaje de 67 / 121 dientes) y la segunda armónica de 12095 Hz que predomina con amplitudes de 1,4 g pk en el espectro, se observan bandas laterales alrededor de la frecuencia de engrane y su armónica con la velocidad de giro de la turbina en 90,3 Hz y del generador en 50 Hz por modulación que es normal encontrar en los reductores.

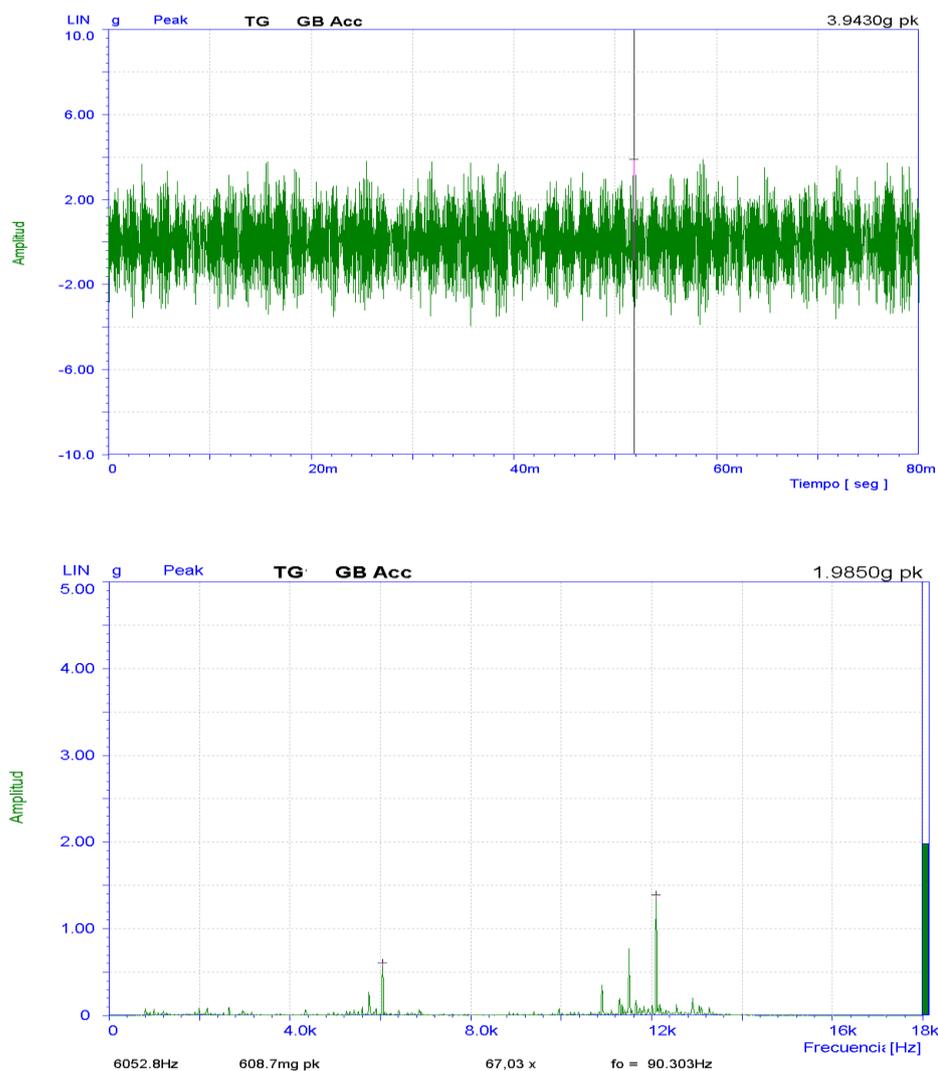


Figura 3. Señal temporal y espectro de las vibraciones en aceleración de la caja reductora en condiciones normales.

En condiciones de altas aceleraciones “ver Fig. 4”, se observa picos de 8,0 g pk en la señal temporal con modulación en la frecuencia de 90,3 Hz y 300 Hz. Esto se presenta como bandas laterales en el espectro en la zona de los 6 kHz en la frecuencia de engrane.

El mayor incremento en condiciones de altas aceleraciones es en la frecuencia de engrane a 6047 Hz con una amplitud de 3,06 g pk en el espectro. La segunda armónica a 12095 Hz tiene poco incremento según (Taylor J.I. 2000) esto puede deberse a una desalineación de los engranajes.

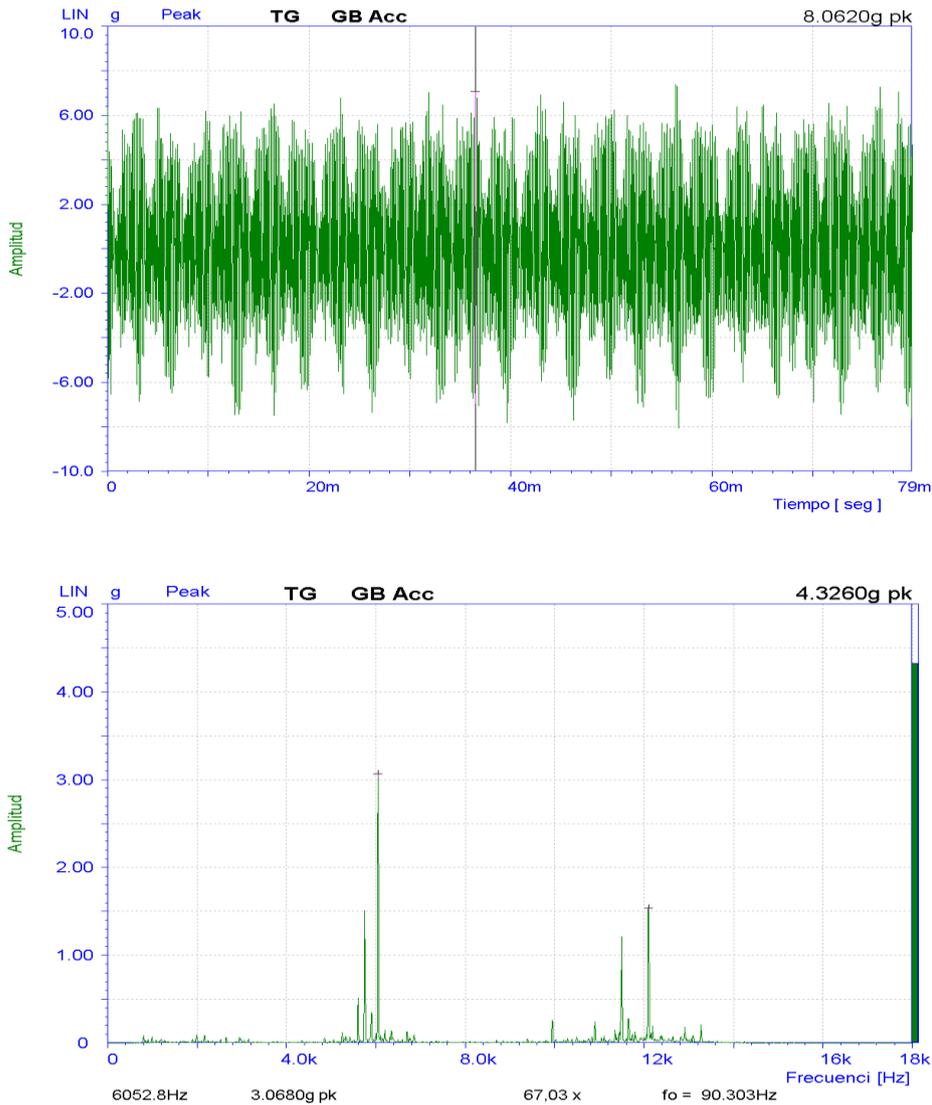


Figura 4. Señal temporal y espectro de las vibraciones en aceleración de la caja reductora en condiciones de altas vibraciones.

El cepstrum es un procesamiento de la señal que toma el modulo del espectro en escala logarítmica y vuelve a aplicarle la transformada de Fourier, El cepstrum se define como el espectro del espectro en escala logarítmica, volviendo a un gráfico en escala de tiempos modificada ya que no es la misma de la señal temporal. La capacidad del Cepstrum reside en detectar las familias de bandas laterales de una frecuencia de

engrane en el espectro, que se encuentran a una diferencia equidistante de la central. Cuando más grande es el número de una familia de bandas laterales tanto más alto será el pico correspondiente en el gráfico. En la caja reductora se aplicó el Cesptrum “ver fig. 5” se encontró modulación por la existencia de bandas laterales en el espectro en 11 ms y armónicas correspondiente a la velocidad de giro del eje de entrada en 90,3 Hz y también en 20 ms relacionado con la velocidad de salida en 50 Hz.

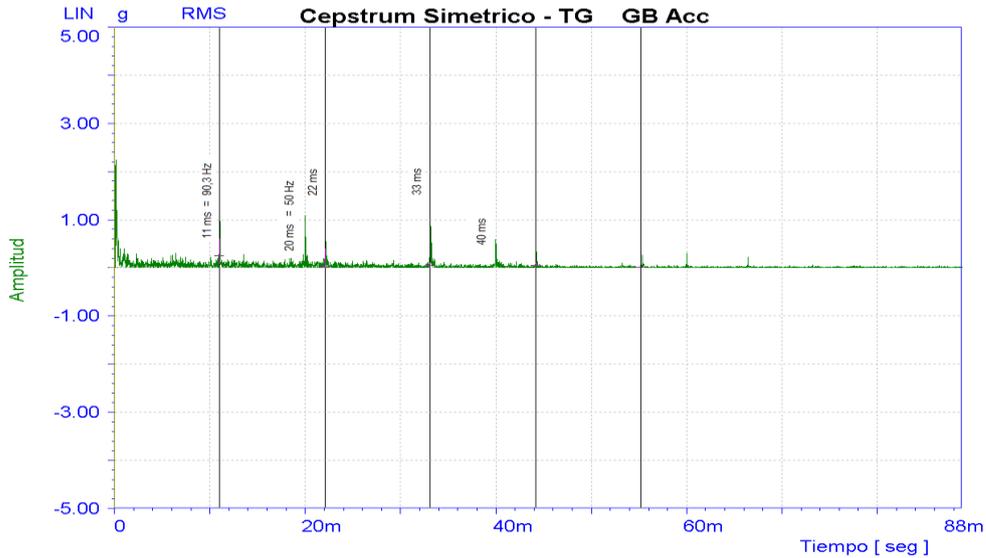


Figura 5.

Señal temporal y espectro de las vibraciones en aceleración de la caja reductora en condiciones

4. ANALISIS DE VIBRACIONES EN TIEMPO-FRECUENCIA

En un gráfico de cascada de espectro se puede observar las variaciones de las amplitudes principalmente en la componente de engrane de 6050 Hz que en el ejemplo dura unos 3 segundos “ver fig. 6” Estas variaciones si bien llegan a los valores de Alarma y Disparo en sistema de monitoreo continuo tiene un retardo de unos 3 segundos, que es configurable en el sistema, esto se configura así para evitar que señales espurias produzcan un falso disparo de la máquina. En algunos casos se produjeron disparos que provocaron este análisis de las vibraciones de la turbina. La solución transitoria fue elevar los niveles de disparo de 8 a 10 g pk.

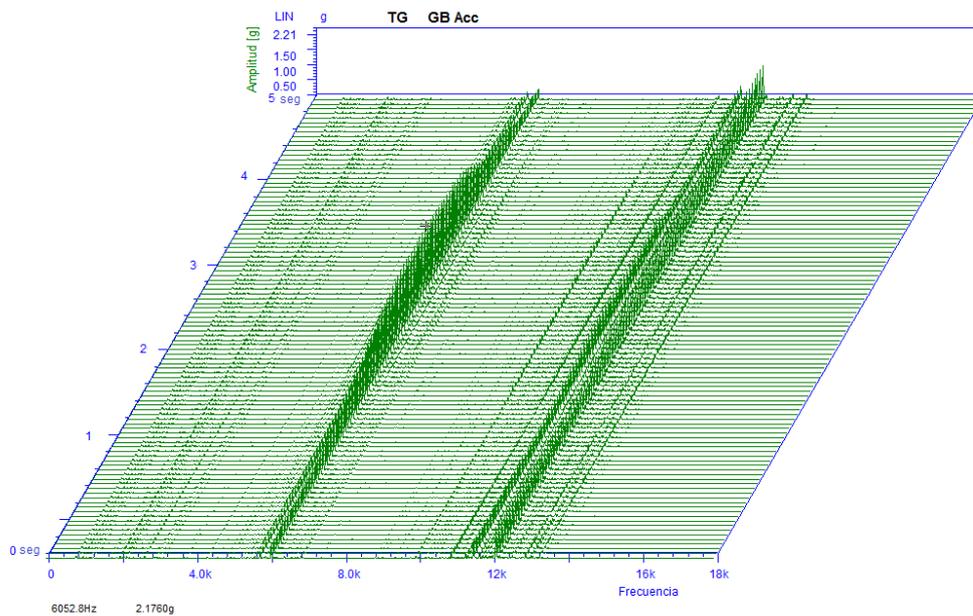


Figura 6. Diagrama de cascada espectros en un tiempo de 5 segundos con un evento de altas aceleraciones en la frecuencia de engrane.

El espectrograma muestra un diagrama tiempo frecuencia de las variaciones de las vibraciones “ver fig. 7”, también llamado JTFA “Join Time-Frequency Analysis” este gráfico detecta las variaciones de las amplitudes y frecuencia, coloreando en una escala de azul la menos intensa a rojo la de mayor amplitud de vibraciones, en una señal no estacionaria como la de la caja reductora en condiciones anormales. En el eje de ordenadas se muestran los espectros de cero a la frecuencia máxima y en abscisas el tiempo transcurrido de la medición. Se observa que en la frecuencia del primer pico en 6050 Hz en la mitad de la escala de tiempo aumenta el brillo pasando a color amarillo porque las amplitudes son mayores alcanzando los 8 g pk en ese momento el segundo pico en 12095 Hz no tiene mayores variaciones de amplitud.

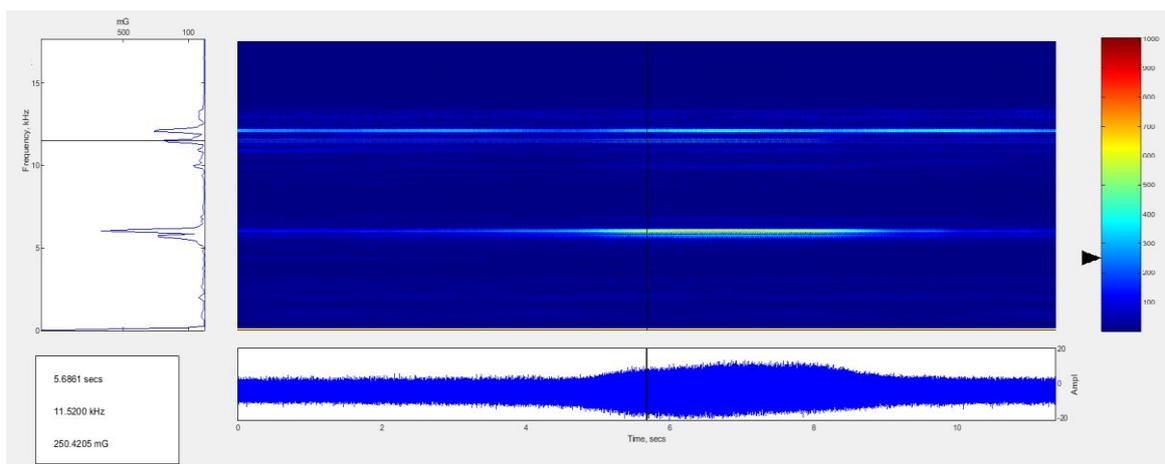


Figura 7. Señal temporal y espectro de las vibraciones en aceleración de la caja reductora en condiciones de altas vibraciones.

5. VIBRACIONES EN DOS TURBINAS

En otras mediciones de las aceleraciones de las cajas reductoras realizadas a dos turbinas similares de la misma central, que tienen el mismo problema, se registraron en el sistema de control de la planta las aceleraciones y la frecuencia con un tiempo entre mediciones de aproximadamente 3 segundos, por lo que no siempre se detectó los máximos. Se observa “ver fig. 8” que se repite el patrón de cuando baja o sube la velocidad de giro de las maquinas condicionadas por la frecuencia de la red aparecen picos de aceleraciones que se repiten en las dos turbinas indicando que el problema es del mismo origen, dado por el generador que produce un empuje axial al reductor modificando la pisada de los dientes.

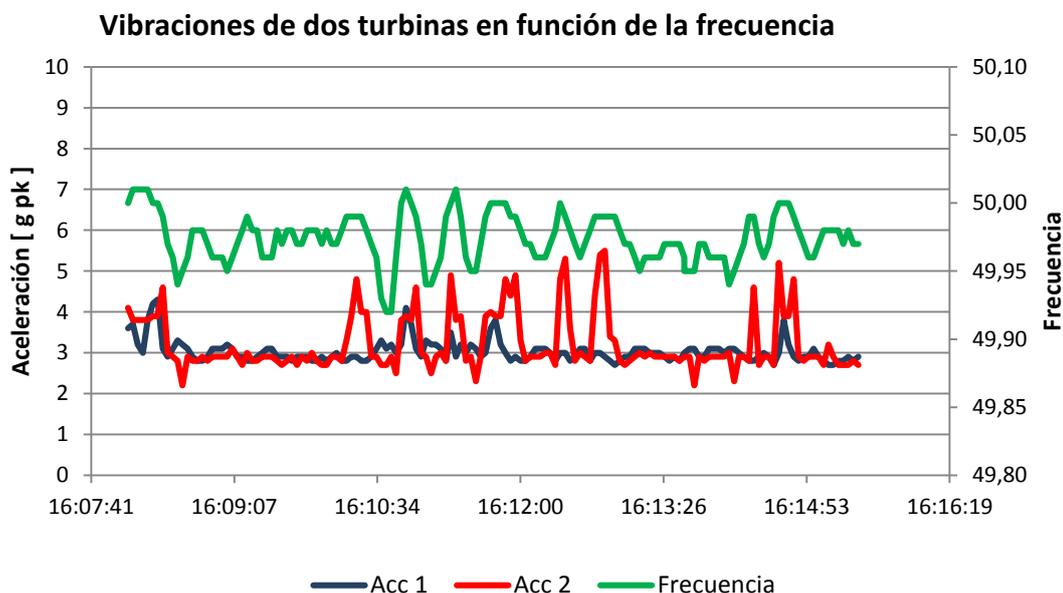


Figura 8. Vibraciones de dos turbinas de la misma central con la referencia de frecuencia.

1. CONCLUSIONES

Las variaciones de amplitud de las aceleraciones en la caja reductora son producidas por un empuje causado por el generador ante variaciones de la frecuencia del sistema interconectado y por ende de la carga de la máquina, este es el diagnostico principal. Esto se debe a la posición axial del rotor de generador que esta levemente fuera de su centro magnético. El generador tiene una marca de referencia para la alineación que debe indicar esta posición del centro magnético, pero después de varios mantenimientos y desarmes esta referencia esta dañada y no es confiable. En condiciones de variaciones de carga el empuje del rotor hace que los engranajes doble helicoidales se carguen más en una de las dos ruedas y provocan el aumento de las aceleraciones por un corto tiempo. La recomendación que se le hizo a la empresa es controlar el centro magnético del generador según recomendaciones del fabricante y realizar si es necesario la realineación, por otro lado instalar un sensor inductivo de proximidad axial en el eje de salida del reductor para controlar las variaciones de posición axial del generador, tener en cuenta que el eje de salida del reductor esta acoplado rígidamente al generador.

REFERENCIAS

- [1] Taylor J.I. The Gear Analysis Handbook, VCI, 2000.
- [2] Eisenmann R. Machinery Malfunction Diagnosis and Correction, Printice Hall PTR, 1998.
- [3] Bently D. E. Fundamentals of Rotaring Machinery Diagnostics, Bently Pressurized Bearing Press, 2002.
- [4] Mobley R.K., *An introduction to predictive manteinance*, 2nd Ed., Ed. Butterworth Heinemann (Elsevier Science) 2002.
- [5] V. Sharma, A. parey, *A review of gear fault diagnosis using various condition indicators*, Procedia Engineering vol. 144, pp 253-263, 2016.
- [6] A. Klemnow y otros, *Curso de Vibraciones Mecánicas Nivel I y II*, Univ. Tecnológica Nacional Reg. Delta (Argentina), Mayo 2005.
- [7] F. Combet, L. Gelman, *Optimal filtering of gears signals for early damage detection base on spectral kurtosis*, MSSP vol 23, pp652-668, 2009.
- [8] C. Hu y otros, *Development of a gear vibration indicator and its application in gear wear monitoring*, MSSP vol 76-77, pp 319-336, 2016.

MEDICIÓN DE RUIDO EN PEQUEÑAS TURBINAS EÓLICAS

Labriola C.L.^a, Colón D. L.^a, Lassig J.^b y Paleseb C.^b

^a*Departamento de Electrotecnia, FAIN, Universidad Nacional del Comahue (UNCo)*

^b*Departamento de Mecánica, Facultad de Ingeniería (FAIN), UNCo
Neuquén, Argentina*

e-mail: carloslabriola54@yahoo.com.ar – 1982daniel@gmail.com

RESUMEN

Dado el impulso a nivel Nacional que está dando la Ley de Energía Renovable, en particular en las aplicaciones de Generación Domiciliaria (Co-generación/Uso racional de la Energía – CG-URE) bajo el concepto de Generador/Usuario (GU), además el hecho de integrar varias fuentes de energía renovable en esos casos (Solar Fotovoltaica, Mini/Micro Eólica, Hidráulica con aguas grises [1]) y en particular las diferencias de ruido emitido y vibraciones entre mini/micro turbinas eólicas de eje vertical y horizontal [2], se propone la medición in situ del ruido y vibraciones para ser integrada al esquema de ensayos para la certificación de la instalación y verificación durante el primer año de operación en el ciclo de vida [3]. Como se sabe cuantas más aspas posee una turbina, su velocidad del rotor es menor a igualdad de potencia generada y diámetro. También la velocidad específica óptima de las turbinas de eje vertical Darrieus es menor que el caso de las turbinas de eje horizontal a igualdad de diámetro, potencia y número de aspas [3]. Desde el punto de vista de la oferta de turbinas eólicas, la mayoría de las turbinas de 1 a 10kW de eje horizontal poseen dos o tres aspas, mientras que las Darrieus poseen 2 a 5 aspas e incluso dispuestas en forma helicoidal respecto del eje del rotor, para reducir las variaciones del par transferido al generador. De esta manera es importante comparar con mediciones in situ cómo las turbinas Darrieus de 3 a 5 aspas poseen menor ruido y vibraciones transferidas a los apoyos. El esquema de medición propuesto consta de 2 micrófonos y 4 sensores piezoeléctricos y procesamiento digital de señales. El sistema propuesto es adecuado para la medición de ruido y los valores obtenidos son adecuados.

Palabras Clave: Medición, Ruido, Turbinas Darrieus, Procesamiento.

1. INTRODUCCIÓN

A nivel mundial, desde el 2005 hay aplicaciones eólicas en ambientes urbanos donde la tecnología aplicada es variada, va desde las pequeñas eólicas (1-65kW), pasando por las medianas y hasta las grandes turbinas (cientos de kW) integradas a los edificios. Dicha tecnología va desde eje vertical (Savonius, Darrieus) a eje horizontal (de dos aspas a multiaspas). El caso que más ha llamado la atención es el de Bahrain, 2007 [4]. (Fig. 1). Pero inicialmente no fue exitoso, dado que hubo déficit de previsiones en impactos de ruido y vibraciones, fatiga de materiales y fundamentalmente sobre el estudio del recurso eólico en el edificio a instalar las turbinas. Si bien el proyecto de Bahrain fue el disparador del uso de la Energía Eólica en edificios a partir del 2007, tuvo que ser corregido en los años posteriores.



Fig. 1. Bahrain Trade Center con tres turbinas eólicas (3x225kW), desmontadas a los pocos meses de inauguración por ruido y vibraciones en los ambientes del edificio [4].

Particularmente para el caso del recurso eólico, podemos decir que la estructura edilicia y la altura favorece el incremento de la velocidad media del viento en las terrazas en general, aportando 1 a 2m/s adicionales a la velocidad media meteorológica del lugar. Además dependiendo de la forma del edificio o casa, se pueden integrar otras fuentes de energía renovable, como ser: solar (paneles fotovoltaicos) y microhidráulica (acumulación de aguas grises y posterior turbinado) [4].

En nuestro país, en la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional del Comahue (FIUNCo), existe un Centro de Estudios y Análisis de Aplicaciones de Fuentes de Energía Renovable (CEAAFER) [5], donde una de las tareas desde su inicio, es el estudio del Recurso Eólico en Ambientes Urbanos y analizar cual tecnología eólica es mas conveniente respecto de aspectos energéticos/económicos, de confort, estéticos y ambientales. Se han desarrollado turbinas de eje horizontal y de eje vertical y ensayado otras de diseños privados según se muestran en la Fig. 2.

En la región, la integración de turbinas mini-microeólicas en aplicaciones agrarias, y en particular, últimamente en ambientes urbanos se está realizando sobre todo por usuarios domésticos y PYMES ante la suba de tarifas y/o poca confiabilidad de abastecimiento de la red de BT.

Es relevante para el análisis de las fuentes de ruidos y/o vibraciones en un dispositivo electromecánico conocer el comportamiento de las partes involucradas en el proceso de conversión de energía y sus accesorios para poder identificar dichas fuentes. En los próximos puntos nos referiremos a ello (2 -3-4) y luego resumiremos cuales son y en qué tipo de turbina son menores (5).



Fig. 2. Turbinas desarrollo propio (Darrieus – derecha[6]) y ensayadas a pedido (Flujo transversal, Ing. Buitrago – Izquierda [7]) en el CEAAFER de la FIUNCo, Neuquén, Argentina

2. ASPECTOS PARAMÉTRICOS Y CONSTRUCTIVOS DE LAS TURBINAS EÓLICAS

La acción del viento en los rotores eólicos permite su movimiento por transmisión de la energía cinética del aire en movimiento al rotor en un porcentaje dado por el coeficiente de potencia según sea el tipo de rotor eólico, de eje vertical u horizontal, de baja solidez u alta solidez del mismo. El Coeficiente de Potencia (C_p) se define como la relación entre la potencia extraída del viento sobre la proporcionada por el mismo y la Solidez (σ) es la relación entre el área neta del rotor sobre el área barrida por el rotor en movimiento. El C_p normalmente viene graficado en función de la velocidad específica λ que es la relación entre la velocidad periférica del rotor en extremo de aspa ($\omega.R$) sobre la velocidad del viento no perturbado del lugar (v_∞). En la Fig. 3 se pueden apreciar los C_p vs λ para distintos tipos de rotor [3].

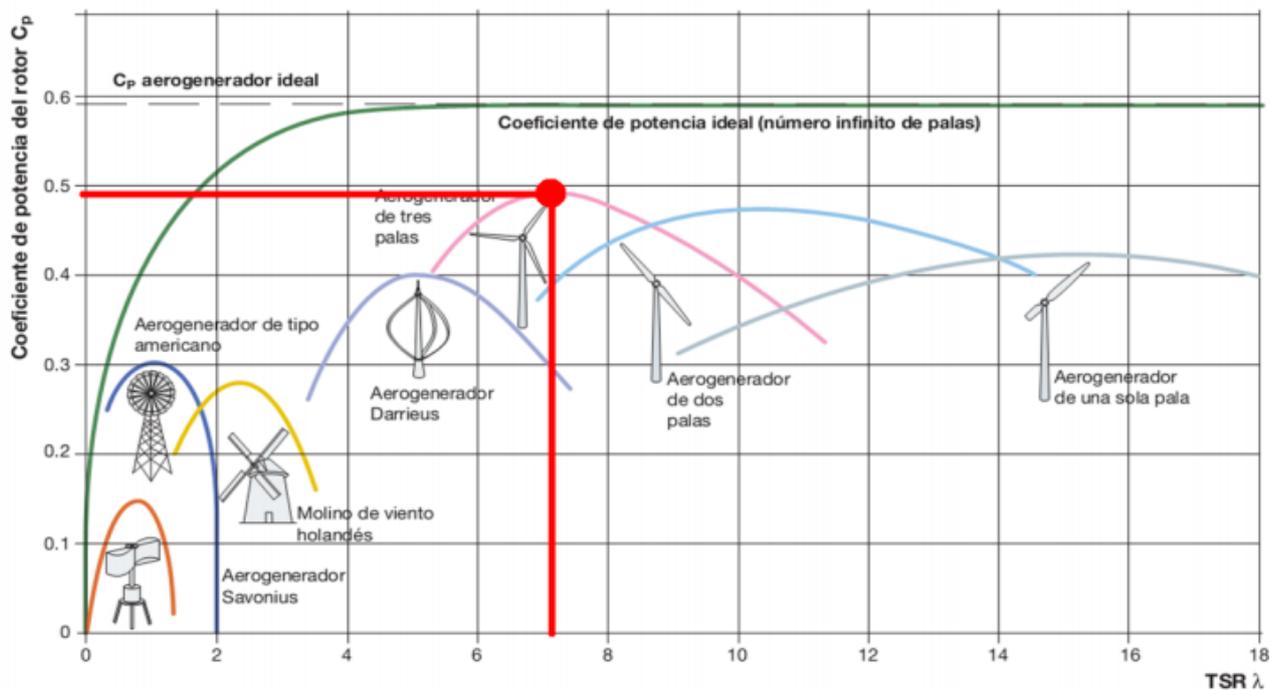


Fig. 3: C_p vs λ para distintos tipos de rotores, alta solidez ($\lambda < 2$) y baja solidez ($\lambda \geq 4$), destacándose la hélice de tres aspas con $C_{p_{max}}: 0,49$ ensayo de rotor prototipo [3].

Como puede verse este tipo de gráficos no discrimina el tamaño del rotor o turbina, sino que solo se refiere al tipo utilizado en grandes tamaños de turbinas. Es de notar que a medida que se reduce el

tamaño, caso de rotores de 10m de diámetro o menor (aplicación urbana), el C_p disminuye y en el caso de las turbinas de baja solidez raramente supera el valor de 0,25. Esto se da por la incidencia de las pérdidas inducidas por el tamaño, terminaciones, homogeneidad de las aspas y de densidad del material, necesidad de soportes entre aspas del rotor, etc. Esta reducción se aprecia en ensayos de túneles de viento de modelos a escala o prototipos de mini-micro turbinas eólicas [6].

2.2. INFLUENCIA DEL NRO. DE ASPAS DEL ROTOR.

En la Fig. 3 cómo varía la solidez con la cantidad de aspas, también se puede apreciar el valor del par o torque máximo obtenido en el rotor a igualdad de diámetro y variación del número de aspas.

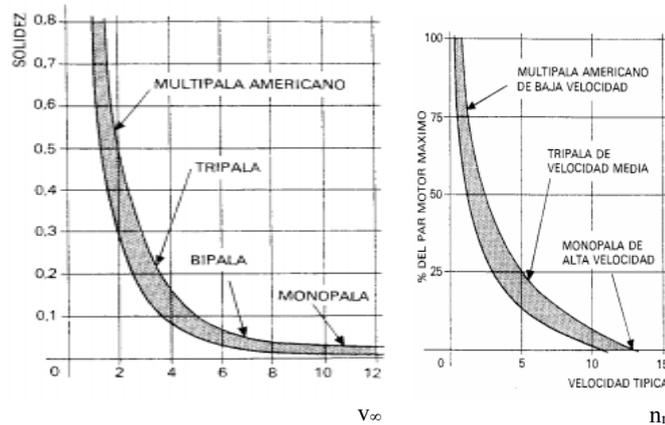


Fig. 4: Solidez (σ) vs velocidad del lugar (v_∞) (der.) $\%Par_{max}$. Vs Velocidad típica del rotor (n_n) (izq.)[8]

También podemos apreciar en Fig. 5 la leve variación del C_p para una misma turbina aumentando el número de aspas. Se puede apreciar que para velocidades específicas bajas o sea alta velocidad de viento del lugar (ya que ωR varia solo un 10 a 20% en rango de operación), se destaca la diferencia del C_p . O sea más aspas menor ruido y mayor C_p .

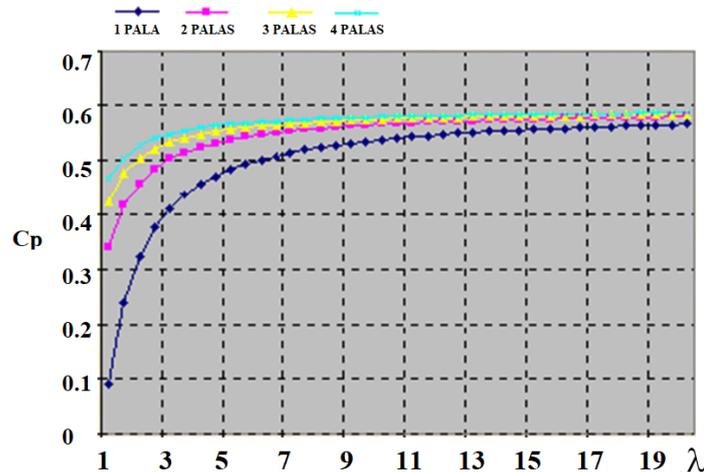


Fig. 5: Variación del C_p con λ [9]

Hay que destacar que a mayor número de aspas también hay una estela con mayor intensidad de vórtices (Fig.6), lo que hace que otra turbina que este cerca reduzca su eficiencia y esté sujeta a vibraciones.

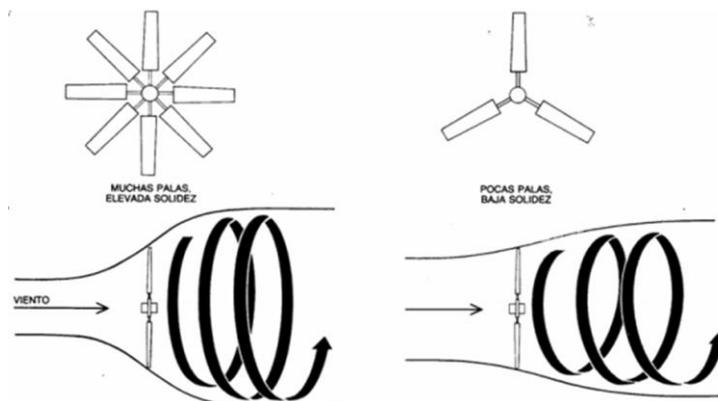


Fig. 6.: Variación de la estela aguas abajo del rotor con el número de aspas [9]

La variación del par con el número de aspas se puede interpretar de la siguiente manera: si poseo un rotor de dos aspas con una excitación dada por el viento sobre el rotor, los medios de transferencia de par al eje son solo esas dos aspas y lo harán con un módulo determinado. En cambio si poseo 4 aspas, a igualdad de excitación de par al rotor, ahora hay el doble de medios de transferencia al eje por lo tanto el par por aspa es la mitad. Esto quiere decir que a medida que aumento el número de aspas en rotores de igual diámetro, el par aplicado por aspa va disminuyendo a medida que el número de aspas es mayor [3]. De la misma manera ya que la potencia es proporcional al área barrida y al mantenerse el diámetro constante, la potencia de los rotores será equivalente y la sumatoria de las contribuciones de cada aspa a la potencia de salida en cada rotor será la misma, entonces la velocidad del rotor debe disminuir para poder mantener la misma potencia aumentando el número de aspas [3]. En las Figs. 7ª y 7b se puede ver la variación del torque para turbinas Darrieus-Troposkien de dos y tres aspas con velocidades del orden de 10m/s y la variación del torque con dos aspas e incremento de la velocidad del viento del lugar.

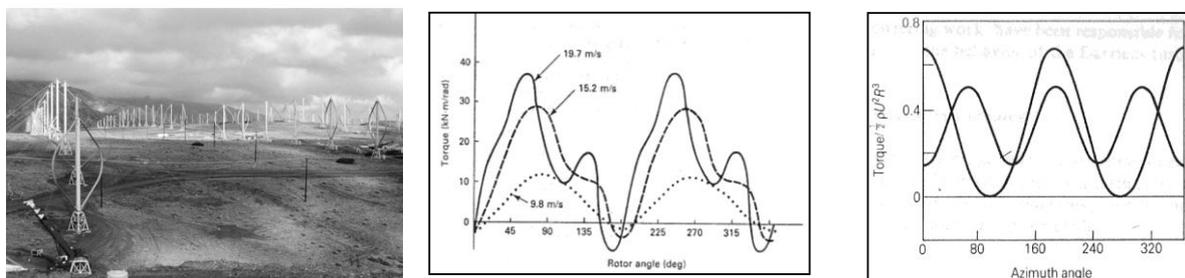


Fig. 7. a: Parque eólico

Tehachapi, EEUU, 1980-1990 – b: Variación del torque con Nro. de aspas e igual área barrida – c: variación del torque para rotor de 2 aspas e incremento de v_{∞} .

3. LOS SISTEMAS DE CONTROL EN MICRO-MINI EÓLICAS

Las Micro-Mini eólicas según la normativa vigente (IEC61400-2) [11] van desde menos de 1kW hasta 65kW, poseen básicamente dos sistemas de control [3]:

- Turbinas de eje Horizontal: Control de potencia constante superada la $v_{nominal}$ de viento a que está especificada la turbina. Este puede ser:
 - Control Pitch por variación del ángulo del aspa
 - Control por pérdida de carga (Stall) a lo largo del aspa, con aspa fija.
- Ambos tipos de turbinas: Control de frenado normal y frenado de emergencia:
 - En eje vertical es un control que si bien esta a nivel de piso, es crítico ya que este tipo de turbinas tienden a embalsarse.

- En Eje horizontal el frenado puede ser con plegado de cola no alineada con el eje del rotor (mas común), por cabeceo o por sistema centrífugo.

El control de potencia en eje horizontal tipo Pitch complejiza la turbina sobretodo en mantenimiento y trabaja mucho en régimen con ráfagas o con posibilidad de turbulencias. De no estar bien balanceado puede ser causa de ruidos y/o zumbidos y sobretodo vibraciones en la columna. En aplicaciones urbanas es mejor utilizar control Stall en turbinas de eje horizontal.

El frenado en eje vertical es robusto y trabaja bastante por los embales del rotor ante ráfagas, pero esta a nivel de piso y pueden aislarse sus vibraciones con juntas anti-vibratorias. El frenado por plegado de cola y cabeceo es particularmente ruidoso ante ráfagas y turbulencia, no así los centrífugos pero necesitan mantenimiento y revisión periódica.

4. COMPARACIÓN ENTRE TURBINAS DE EJE VERTICAL Y HORIZONTAL EN APLICACIONES URBANAS

El mercado y los desarrollos locales nos ofrecen distintas formas de turbinas de eje horizontal y vertical según podemos apreciar en la Fig.8:

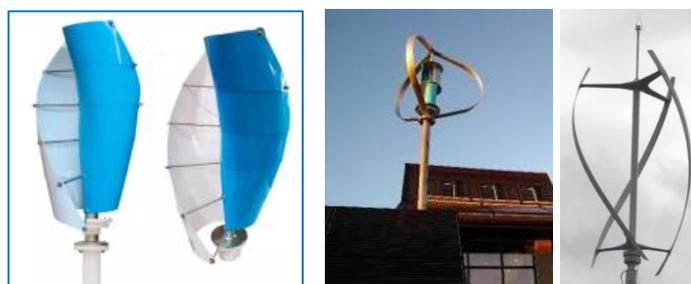


Fig. 8. a: Savonius – b:Darieus-Troposkien de tres aspas –c: Orlov (Darrieus Helicoidal tripala) [4].



Fig. 9. a y b: Turbina eje Horizontal de 5 aspas, (a) orientación limitada, (b) orientable – c: turbina de tres aspas [4].

En base a las formas expuestas en Figs. 8 y 9, y su comportamiento podemos realizar una tabla comparativa:

Tabla1: Comparación de aplicación de mini-micro turbinas en ambientes urbanos [3].

Eje Horizontal	Eje Vertical
Con dos o tres aspas el rotor emite ruido durante las ráfagas y/o durante el control de potencia. Mas zumbido cuanto el material de las aspas es más flexible	Como trabajan a una velocidad específica menor a igualdad de potencia que las turbinas de eje horizontal, emiten menos ruido y vibraciones al edificio.
Las turbinas multi-aspas emiten menor ruido y transmiten menos vibraciones a las estructuras de los edificios. Pero son orientables.	Los rotores se hacen de variada cantidad de aspas de distintos materiales (1 a 5 aspas) y a veces en desarrollo helicoidal (Fig. 8 a y 8c), reduciendo el ruido y alternancia del par y potencia considerablemente.
$C_p = 0,25$, dado por la forma constructiva de su tamaño.	

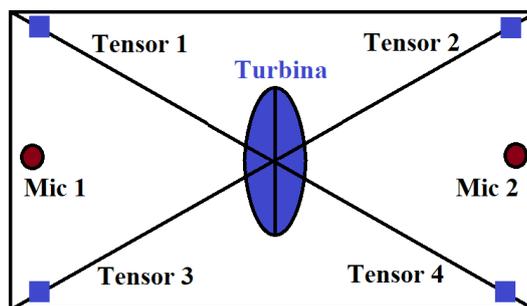
Para vientos de dirección preponderante conviene limitar la orientación con topes en línea perpendicular a la dirección de viento. Puede ser fuente de ruidos.	Las turbinas Savonius poseen un C_p : de 0,15 a 0,2 y debe cuidarse su arriostamiento en lugares con muchas turbulencias o ráfagas por su alta solidez.
Las partes pesadas y móviles están en góndola dispuesta en extremo de torre instalada en la terraza. Necesitan sistemas de orientación.	Las partes electromecánicas móviles están a nivel de piso facilitando instalación y mantenimiento. Son omnidireccionales, no necesitan sistemas de orientación
Antes de definir lugar de instalación, se deben estudiar las turbulencias en la terraza del edificio (túnel de viento y simulaciones), éstas pueden reducir la vida útil o generar algún siniestro de no ubicarse la turbina fuera de ellas y desprenderse piezas o partes.	En general estas turbinas van arriostradas con dos o tres tensores desde extremo superior del eje vertical, los que deben verificarse en mantenimientos periódicos en el primer año.
Las turbinas de cornisa fijas (Fig.2. Buitrago), son de eje horizontal limitadas a la dirección preferencial del viento y poseen un C_p : 0,15 a 0,2 que las hace muy interesante para combinar con otras fuentes renovables.	Las turbinas de cornisa con su eje vertical pueden funcionar omnidireccionales, con varias entradas para el viento, aumentando su potencia con difusores.
Sistemas de Control de orientación Pitch muy sensible ante ráfagas y turbulencias con necesidad de mantenimiento prematuro.	La forma constructiva de las turbinas de eje vertical de mercado no permiten control Pitch.
Sistemas de frenado por cabeceo y plegado de cola son ruidosos y deben revisarse periódicamente los tacos limitadores. El frenado centrífugo necesita mantenimiento y calibración en régimen de ráfagas y/o de turbulencias.	El sistema de frenado a nivel de piso (disco o centrífugo) son robustos. No se recomienda en Darrieus frenado por spoiler centrífugo en zona ecuatorial del rotor porque por la alternancia del par introduce vibraciones y fatiga prematura en el rotor.

5. ASPECTOS A CONSIDERAR EN EL ORIGEN DE RUIDOS EN MINI- MICRO EÓLICAS

Según lo expuesto, las consideraciones para establecer el origen de ruido, vibraciones y/o zumbidos en Mini-Micro eólica, pueden ser:

- a- A menor número de aspas mayor módulo de par y posibles vibraciones a la estructura de soporte.
- b- En eje horizontal los topes de limitación de orientación pueden ocasionar golpes originando ruidos y vibraciones en la estructura.
- c- Lambda óptimo ($\lambda=6$) en eje vertical (λ de mayor C_p) es menor que eje horizontal ($\lambda=8$) por lo tanto a igualdad de potencia las turbinas de eje vertical generan menor ruido y vibraciones en forma relativa a las de eje horizontal.
- d- En eje vertical Darrieus las aspas helicoides entran en el flujo de viento por secciones en vez de hacerlo completamente como en aspas rectas en HDarrieus i Darrieus troposkien. Esto reduce las alternancias del módulo del par y por lo tanto las posibilidades de vibraciones o ruido.
- e- En eje vertical (Darrieus o savonius) en general usan tensores de arriostamiento; si no poseen reductores de vibración será ocasión de vibraciones y ruidos a la estructura.
- f- Los materiales muy flexibles usados en aspas originan zumbido al flexionarse las mismas con la turbulencia o ráfagas. Es el caso de algunas turbinas de eje horizontal (Whisper, EEUU). Para las de eje vertical por su forma, soportes y materiales (Fibra de Vidrio con resinas plásticas o metales) no poseen este problema.

6. SISTEMA PROPUESTO DE MEDICIÓN DE RUIDO



■ Sensores Piezoeléctricos

Fig. 10. Esquema de ubicación de sensores.

La misma consta de 4 sensores piezoeléctricos (Fig 13 b) colocados en forma adecuada para registrar las distorsiones causadas por los cambios de tensión y movimiento de la pequeña turbina de eje vertical (Fig. 10). Del mismo modo se colocan 2 micrófonos los cuales estarán conectados como entradas para el esquema de medición de ruido acústico en un esquema como se muestra en la Fig. 11.

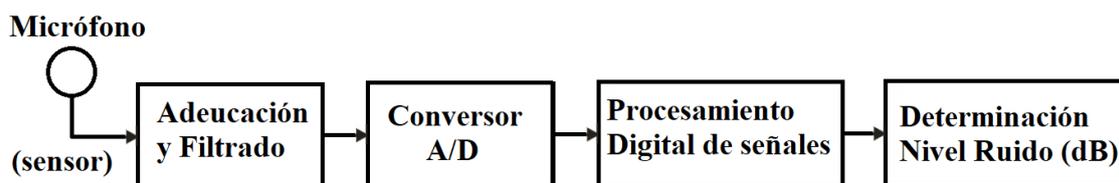


Fig. 11. Esquema de Adquisición y Procesamiento de datos para la medición en pequeñas turbinas.

En la etapa experimental se utiliza un DSP (unidad de Procesamiento digital de señales [12]) Arduino DUE [13] (Fig 12 a). Este DSP permite trabajar a una velocidad de clock de 24MHz, posee 2 DAC de hasta 12 bits y una frecuencia de muestreo máxima cercana a los 500KHz. Este tipo de dispositivos es importante trabajarlos con valores de tensión no negativos, por lo cual la señal captada por los micrófonos se debe acondicionar, sumando la señal a adquirir en una componente de continua.

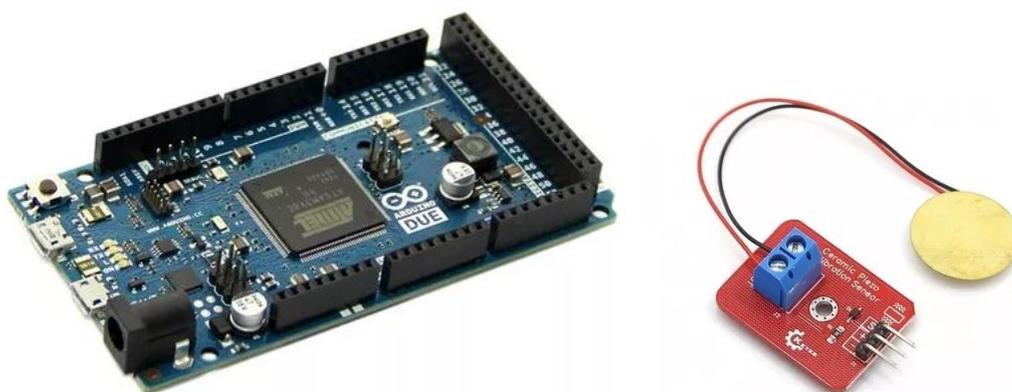


Fig. 11. a) Arduino Due r3. B) Sensores piezoeléctricos.

Establecidos los circuitos de acondicionamiento y los sensores de entrada se puede adquirir los datos de entrada. En función de los parámetros de ruido sonoro y de vibración, se puede comparar los valores establecidos en la tabla 1. Se considera necesario aun mejorar el circuito y la ubicación de los sensores para tener un criterio sobre la mejor ubicación.

También es importante destacar que en un etapa experimental los dispositivos Arduino ofrecen un muy buena relación costo-beneficio, y una gran versatilidad para modificar el sistema de adquisición de datos, se pueden incluir un módulo de lector de memoria para almacenar los valores adquiridos, o un módulo LAN o WiFi para transmitir los valores en tiempo real, y poder realizar un monitorio con alertas para valores de ruido o vibración elevados.

7. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

7.A. CONCLUSIONES:

En lo que respecta a la elección de la tecnología a aplicar, eje vertical u horizontal, los puntos 4, 5 y 6 definen a las turbinas de eje vertical como las menos ruidosas y en particular las Darrieus multiaspas (≥ 3) y helicoidales (Orlov). Las de Flujo transversal con eje horizontal (Ing. Huitrigo) son recomendables para cornisas en lugares de viento preponderante en una dirección. Con el eje Vertical se comportan como las ha Darrieus. Las de eje vertical no sólo tienen ventajas en lo referente a menor generación de ruidos, zumbidos y vibraciones, sino que tienen menos cantidad de controles y partes móviles, por consiguiente más sencillas de instalar, operar y mantener con menor riesgo a las personas asociadas a ellas.

7.B. RECOMENDACIONES:

En lo referente a los generadores actualmente el mercado ofrece generadores de imanes permanentes (IP) de Nd-Fe-Bo, generando a CA en frecuencia variable con el viento, la cual es rectificadora y si es necesario a través de un regulador de tensión puede cargar baterías. Esa CC también se puede pasar por un ondulator tiristorizado que genera CA a frecuencia de red. Esta es la forma más sencilla económica y compacta para realizar la conexión de energía eléctrica a la red con sistemas de protección y contactores normales de uso domiciliario. Dichos generadores deben disponer los IP en el rotor ya que de estar en el estator se complejiza la construcción y mantenimiento del generador que necesitará escobillas y anillos rozantes. Los desgastes en los sistemas de escobillas y anillos rozantes pueden dar ruidos o zumbidos no deseados, por ello requieren un mantenimiento periódico.

REFERENCIAS

- [1] Solar Cities, 2014: 5° Congreso Internacional de Solar Cities, lema: “Energía en las ciudades: Innovación frente al Cambio Climático”. Trabajo presentado: Aprovechamiento de Fuentes de Energía Renovable intrínsecas y externas a un edificio de varios pisos”, autores: MSC. Labriola, Dr. Lassig, Sr. Padilla. Centro Metropolitano de Diseño, CABA, 18 al 20 de julio del 2014.
- [2] MED GREEN Forum, 2017: Mediterranean Green buildings & renewable energy forum -2017. Part of World Renewable Energy Congress. Trabajo Ppresentado: “Wind energy potential research in a low building within an urban environment” Autores Jorge Lassig, Claudia Palese, Carlos LAbriola, Juan Valle Sosa, Ubaldo Jara , Florencia Italia, 25 al 28 de Julio 2017.
- [3] UGS, 2019: “Seminario pequeñas turbinas eólicas”, Red CYTED, dictado por MSc. Carlos V.M.Labriola en Facultad de Ingeniería de la Universidad de General Sarmineto, Pcia. De Buenos Aires, 22 y 23 de marzo, 2019.
- [4] CURSO IEE, 2019: “Introducción a la Energía Eólica”, curso de postgrado, disertante: Dr. Jorge Lassig, FIUNCo, Neuquén, mayo 2019.
- [5] CEAAFER, 2011: Creación del “Centro de Estudios y Análisis de Aplicaciones de Fuentes de Energía Renovable” en la FIUNCo, participan Grupos de Investigación consolidados GES, GIV y LAMHI, resp. MSC. Labriola.
- [6] PICTO –CIN II - 0085, 2010: Proyecto de Investigación Científico-Tecnológica Orientado: “Evaluación de turbinas eólicas desarrolladas en Universidades Patagónicas, en dos micro regiones

- de Neuquén y Santa Cruz” -Director: Dr. Jorge Lassig (FIUNCo) -Co-Director: MSc. Carlos V.M. Labriola (FIUNCo – UACO UNPA). 2010-2014.
- [7] Huitrigo, 2008: Ensayo de turbina eólica transversal, servicio solicitado por Ing. Huitrigo al grupo de Ingeniería del Viento (GIV) a cargo del Dr. Lassig, 2008-2009.
- [8] Deleito Cádiz, 1990: “La Energía Eólica tecnología e historia”, autor Juan Carlos Cádiz Deleito, Editorial Blume, ISBN: 84-7214-298-1, 1990.
- [9] Fariñas Wong, 2010: Monografía “Estudio de Aerogeneradores de pequeña potencia”, autor Dr. Ernesto Yoel Fariñas Wong, 2010.
- [10] SANDIA, 1990: Informe de SANDIA Laboratories, sobre ensayos en Turbinas eólicas Darrieus troposkien con rotores de aluminio Extruido.
- [11] IEC61400.1, 2019: versión 4: “Wind energy generation systems – Part 1: Design requirements”, Norma Internacional de la Comisión Electrotécnica Internacional, 2019 - ISBN 978-2-8322-6253-5.
- [12] D. G. Manolakis, V. K. Ingle, “Applied digital signal processing” Cambridge University Press, 1er ed., UK pp 485-512
- [13] <https://www.arduino.cc/en/Guide/ArduinoDue>

ANALISIS PARA DETERMINAR UNA CLASIFICACIÓN DEL ESTADO DE FONDOS DE TANQUES A PARTIR DE ENSAYOS DE EMISION ACUSTICA Y SU RELACIÓN CON EL FENOMENO DE LA CORROSIÓN ACTIVA.

Montenegro, A. N.^a

“Grupo OAT, Departamento de Mecánica Aplicada, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional del Comahue, ARGENTINA

e-mail: alejandro.montenegro@fain.uncoma.edu.ar

RESUMEN

La técnica de EA se aplica para la evaluación cualitativa del fondo de tanques de almacenamiento en el mundo desde comienzos de los años '80 del Siglo XX, y desde hace más de 20 años se ha producido suficiente información, tanto empírica como en laboratorio, que demuestra su aplicabilidad y confiabilidad.

En Argentina, a partir del año 2008 la Secretaría de Energía permitió aplicar el método de EA para monitoreo del fondo de tanques, basado en la norma ASTM E-1930. Esta norma requiere que el sensor esté en contacto con el fondo del tanque, lo que en los tanques verticales resulta imposible. Esta situación llevó a que diversas empresas realizaran los ensayos de EA en fondos de tanques bajo sus propios procedimientos, que implicó que no siempre sea posible cotejar los diversos resultados.

El IRAM ha realizado el análisis de la Norma EN-15856 de origen europeo, la cual dispone los requisitos de los equipos, del personal y estandariza el procedimiento de monitoreo. Sin embargo, esta norma no contiene una clasificación de los tanques ensayados.

Con este trabajo se buscó explicar los desarrollos llevados a cabo en otros países, los cuales han permitido establecer ciertos criterios cualitativos en la clasificación de los tanques ensayados. Se analizó el origen de estos criterios, su validación, y se discute la aplicabilidad de introducir un criterio de graduación de pisos de tanques en la futura Norma IRAM 725, actualmente en proceso de promulgación.

Palabras Clave: EA en Fondo de Tanques, Clasificación de Tanques, IRAM, Res. 266/08.

1. INTRODUCCION

La técnica de EA se aplica para la evaluación cualitativa del fondo de tanques de almacenamiento en el mundo desde comienzos de los años '80 del Siglo XX, y desde hace más de 20 años se ha producido suficiente información de laboratorio como empírica que demuestra su aplicabilidad y confiabilidad.

Concretamente, existen ya en aplicación en el mundo dos normas que aplican directamente a la estimación del fondo de tanques, la ISO-18081:2016, para detección de fugas [1], y la Norma Europea EN 15856:2010 [2], para la detección de corrosión en el fondo de tanques de almacenamiento.

En nuestro país, a partir del año 2008 la Secretaría de Energía emite un documento bajo el marco de la Res. 266/08 por el cual permite la aplicación del método de EA para monitoreo del fondo del tanque, para que las Operadoras de Hidrocarburos que operan tanques puedan implementar sus planes de inspección y apertura sin afectar la operatividad.

El documento mencionado, el Subanexo V de la Res. SE 785/05 (Cuyo Anexo I es el “Reglamento para el Control de Pérdidas en Tanques Aéreos de Almacenamiento de Hidrocarburos”) indica en sus considerandos que los ensayos deben ser realizados bajo la normativa ASTM E-1930 y luego bajo la normativa que genere IRAM para tal fin [3].

La norma ASTM E-1930 indica que el sensor debe estar en contacto con el sujeto de prueba (el fondo del tanque), lo que en los tanques verticales resulta imposible.

Debido a esto, diversas empresas realizaron los ensayos de EA en fondos de tanques bajo sus propios procedimientos, siempre avalados por un experto nivelado en la técnica como Nivel III [3]. La diversidad de métodos implica que no sea posible cotejar los diversos resultados, con lo cual hacer un seguimiento preciso en el tiempo de la evolución del estado del fondo del tanque resulta muy dificultoso o en algunos casos, imposible.

La adopción por parte de IRAM de la norma ISO-18081:2016 lleva a una mejora en la aplicabilidad del mencionado Subanexo, estableciendo un criterio claro respecto a la detección de pérdida en un tanque; la norma incluso fija disposiciones en cuanto a cómo debe llevarse a cabo la prueba, los requisitos técnicos y del personal actuante, y la información mínima a colocar en los reportes [1].

El IRAM ha promulgado la norma 725, la cual partió del análisis de la norma EN-15856, la cual incluye en su articulado un ensayo prácticamente similar al de la norma ISO antes mencionada. Sin embargo, esta norma europea no contiene una clasificación de los tanques ensayados.

A lo largo de este documento, se explicarán los desarrollos llevados a cabo en otros países, los cuales han permitido establecer ciertos criterios en la clasificación de los tanques ensayados.

Se analizará el origen de estos criterios, su validación, y se discutirá la aplicabilidad de introducir un criterio de graduación de pisos de tanques en la Norma IRAM 725.

2. OBJETIVOS

Analizar los criterios básicos empleados en el mundo para el análisis y clasificación de tanques. Establecer la pertinencia de incluir en la Norma para detección de corrosión en fondo de tanques una clasificación de los mismos. Establecer la clasificación de los mismos.

3. DETECCION DE CORROSION A PARTIR DE SEÑALES DE EA

El fenómeno de la corrosión y su relación con la Emisión Acústica ha sido estudiado por varios grupos de investigadores en los últimos 20 años, combinando estudios de campo con otros realizados en laboratorios.

Cho y Takemoto [4] ensayaron de placas de acero al carbono expuestas a oxidación natural, demostrando que el aumento volumétrico del material al corroerse genera señales

de tipo secundario al golpear contra el sustrato y primarias al quebrarse, que son transmitibles y detectables con EA. Ono [5] indica que debido a la baja intensidad de estas señales, la misma se propagará por el líquido almacenado arribando a los sensores con un rango de frecuencias menor a 100 Khz.

Duthie y Gabriels [6] indican que la tensión que se genera entre la zona corroida y la de metal base es la que genera la fuente primaria de EA en el proceso corrosivo, con una fuente secundaria luego de la deposición de material cuando se quiebran las fibras corroidas. Asimismo, se estima que la diferencia volumétrica entre el material corroido y el normal es de diez veces mayor. Al avanzar el grado de corrosión, aumenta la longitud de las señales.

Estos últimos dos investigadores trabajan bajo el concepto de la EN 15856, la cual, indican, tiene su germen en 1998 a partir de un trabajo de correlación realizado en Europa en tanques que fueron ensayados con EA y luego inspeccionados con END desde su interior.

4. ENSAYOS DE EA VS. INSPECCIONES INTERNAS

Van de Loo y Herrmann, representantes de Shell y Dow respectivamente, publican en 1998 los resultados de un trabajo realizado por un grupo de usuarios de la EA en tanques [7]. Este trabajo fue el puntapié inicial para que la Comisión Europea financie un proyecto integrado entre la industria de la EA en Europa, empresas que aplican la técnica, y operadores, cuyo resultado final fue la mencionada norma EN-15856:2010, según explican Lackner y Tscheliesnig [8, 9].

Los resultados del primer trabajo [7] resultaron concluyentes para continuar desarrollando la técnica, pero indicaba como un problema a resolver que el criterio y la clasificación para la identificación del grado de daño en los tanques sea propiedad de una Compañía privada. Esta compañía a la que se hace referencia es Physical Acoustics Limited, cuyo proceso de trabajo y criterio de gradación de tanques explican Papasalouros et al [10].

El trabajo de la Comisión Europea comenzó por armar una propia base de datos [9] y finalizaría con la norma EN 15856.

5. SISTEMA TANK PAC (PHISICAL ACOUSTICS LTD.)

Según indica Papasalouros [10], el método se basa en la evaluación de la actividad de EA que se genera con la liberación de energía durante la fractura o desprendimiento de productos de corrosión mientras el proceso corrosivo se desarrolla, Esto resulta en una distorsión que se transmite como una onda al fluido cercano y al metal.

El sistema clasifica la actividad de un tanque, a través de una correlación empírica que relaciona el aumento de la actividad de EA tanto con la tasa de corrosión como con la cantidad de material que se corroe.

Este método obtiene la graduación combinando dos sistemas de clasificación:

- La actividad acústica se clasifica en Grados A a E (de menor a Mayor). esto, basado en la experiencia.

- Se define una clasificación de "Potencial de Pérdida", basado en datos empíricos que comparan con características de corrosión localizada. Se gradúan entre 1 a 5

- La combinación matricial de esto otorga una clasificación entre I a IV., con una recomendación de reinspección o apertura.

La base de datos es propiedad de la empresa, que continuamente es retroalimentada con mayor cantidad de trabajos realizados en distintos tanques, con alcance global.

6. PROPUESTA GRUPO DE TRABAJO EUROPEO

Lackner y Tscheliesnig en [9] desarrollan una metodología que les permite sistematizar la información que van a obtener de cada ensayo y luego sistematizan el método de análisis. Luego, proponen una gradación similar a la anteriormente expuesta, y exponen los criterios básicos para ensayar una clasificación [8,9].

Luego, en [11] indican que la aplicación de una gradación similar a la de Physical Acoustics resultó correcta basado en la experiencia de apertura de más de 200 tanques y en el seguimiento continuo de estos, luego de una inspección inicial.

Estos resultados se corresponden con los enunciados inicialmente bajo el primer grupo de trabajo [7].

7. PROPUESTA PARA OBTENER UNA CLASIFICACION APLICABLE

Basado en todo lo anterior, resulta en este punto establecer algunos puntos aclarados:

- La corrosión es una fuente de EA que permite establecer criterios de daño, basados en experiencias comprobables y Normativa desarrollada [12].

- La experiencia demuestra que una graduación en Grupos de tanques tiene correlación entre los ensayos de EA realizados desde 1997 a la fecha.

Se proponen entonces dos Criterios cuya combinación permite establecer una cuantificación del estado del tanque.

Hasta que no exista una base de datos local que permita la modificación o validación de estos índices, se entiende que la misma debe ser necesariamente segura para aportar certeza a este método.

A - Condición del Piso

Este criterio se basa en el Aumento del peligro para la integridad de una estructura si se registra un aumento de la actividad de emisión acústica [12]. Físicamente podemos asumir que si aumenta la actividad es porque hay un proceso evolucionando en el tiempo.

Este criterio permite elaborar la siguiente tabla, que por sí sola es insuficiente para determinar la condición del fondo del tanque:

Tabla I – Criterios de Condición de Fondo

Indice	Condición del Fondo
A	No afectado por la Corrosión – Se detectan hasta 50 eventos localizados o hasta 3 clusters
B	Afectado por corrosión de baja intensidad – hasta 100 eventos localizados o 3 clusters con menos de 10 eventos.
C	Afectado por corrosión de media intensidad – más de 5 clusters y al menos 3 de ellos con entre 10 a 25 eventos en su interior, ó hasta 250 eventos localizados.
D	Afectado por corrosión de alta intensidad – más de 10 clusters y al menos 3 de ellos con más de 25 eventos, o más de 250 eventos localizados.

Ningún Cluster o hasta 3 de ellos indica una baja actividad acústica; podemos decir que existen eventos no relacionados entre sí, por lo tanto no puede aseverarse la existencia de una fuente de EA.

Cantidades localizadas de Clusters permiten indicar que existen zonas donde se registra actividad acústica, por lo cual hay zonas determinadas del cuerpo que conforman una fuente de EA distinguible de cualquier señal aleatoria.

La presencia de casos intermedios debe ser evaluada con mucho cuidado.

B - Tipo de Actividad Acústica

Este criterio se basa en la amplitud y la energía acumulada en los clusters. Verifica también lo estipulado en las normas de referencia [12]. Físicamente, asimila el aumento de intensidad con una mayor degradación o una zona mayor de material que se degrada en un tiempo finito.

Un evento localizado o un clúster que presenta una amplitud (o un promedio de amplitud en el caso de un clúster) alta y una energía (la suma de las energías acumuladas en el caso de un clúster) alta, es más relevante que un evento localizado o un clúster que presenta características opuestas. La energía acumulada nos da una idea de la cantidad de actividad de esa fuente, como demostraron Morofuji et al. [13].

Un análisis conjunto de estos dos parámetros permite establecer una segunda tabla de análisis.

Tabla II – Criterio de Tipo de Actividad

Indice	Tipo de Actividad EA
1	Baja Actividad de EA (Amplitud: promedio igual o hasta 3 Db al Umbral de Detección Ad_t – baja energía acumulada)
2	Media (Amplitud: promedio 15% más alto que el Umbral de Detección Ad_t – media energía acumulada)
3	Alta (Amplitud: promedio 30 % más alta que el Umbral de Detección Ad_t – alta energía acumulada)
4	Muy alta (Amplitud: promedio 50% más alta que el Umbral de Detección Ad_t – muy alta energía acumulada)

Debe tenerse en cuenta que también con este segundo criterio podrían presentarse casos intermedios que se tiene que analizar con mucho cuidado para definir el valor del índice.

La evaluación conjunta con ambos índices, a partir de los criterios mencionados permite establecer el tiempo de funcionamiento hasta un nuevo ensayo de EA, o las acciones a tomar.

Se considera apropiado para incluir todos los sistemas de medición desarrollados hasta el momento, desglosar estos resultados en la siguiente tabla [8], [10]:

Grado	Descripción	Periodo recomendado
I	Sin actividad de EA	5 años
II	Baja Actividad de Corrosión	3 años
III	Actividad media de Corrosión	1 año
IV	Alta actividad de Corrosión/Fuga	Apertura inmediata

Resultando finalmente:

Tipo Actividad EA	Condición del Fondo			
	A	B	C	D
1	Grado I	Grado II	Grado II	Grado III
2	Grado II	Grado II	Grado III	6 meses
3	Grado II	Grado III	6 meses	Grado IV
4	Grado III	6 meses	Grado IV	Grado IV

Como puede apreciarse, se agregó una franja “Especial” para las combinaciones B4, C3 y D2. Esto se debe a que no contamos con la base de datos propia como para poder verificar si estos corresponden a un criterio Grado III o IV, situación por la que ya han pasado quienes han realizado grandes avances en este área [7].

8. CONCLUSIONES

El desarrollo de la norma EN-15856 fue una continua sucesión de desarrollo de investigación de laboratorio y de campo realizado por empresas desarrolladoras de equipos, de servicios y usuarios de tanques.

Los criterios utilizados para arribar a la clasificación se basan en experiencias de laboratorio y experiencia corroborada mediante correlaciones realizados por distintos grupos de trabajo a lo largo de más de 20 años de trabajo continuo, por lo cual proporcionan una base segura para comenzar a establecer la base de datos propia que permita a futuro validar o mejorar los presentes criterios.

En nuestro país, la técnica llega de la mano de la obligatoriedad de la inspección de los tanques, lo que no permite que se haya desarrollado a priori la cooperación entre partes del sistema. Dado que ya existen en la actualidad aplicaciones realizadas por diversas empresas y organismos, la tabla de graduación propuesta busca ser inclusiva al admitir los sistemas desarrollados por distintas filosofías de trabajo y fabricantes.

Debe destacarse la necesidad de elaborar una base de datos nacional para así validar los resultados de los ensayos y la precisión de la graduación propuesta.

REFERENCIAS

- [1] – Standard ISO 18081:2016. International Standards Organization. 2016
- [2] – Standard EN 15856:2010. European Comitee. 2010.
- [3] – Resolución S.E. 785/05. Secretaría de Energía, República Argentina. 2005.
- [4] – Acoustic Emission from Rust in Stress Corrosion Craking. Hideo CHO, Miko TAKEMOTO. Aoyama Gakuin University, Sagamihara, Kanagawa, Japón. 2006.
- [5] – Structural Integrity Evaluation Using Accoustic Emission. Kanji ONO. University of California. Estados Unidos. 2007.
- [6] – Acoustic Emission noise sources during storage tank floor corrosion tests - David B. DUTHIE, Fred GABRIELS. TUV Reinland Sonovation Ltd. Aberdeen, Reino Unido. 2014.
- [7] – How Reliable is Acoustic Emission (AE) Tank Testing? The Quantified Results of an AE Usergroup Correlation Study!. P. J. VAN DE LOO, B. HERRMANN. Shell y Dow. Holanda y Alemania. 2008.
- [8] – Inspection of Flat-bottomed Storage Tanks by acoustical methods; Classification of Corrosion Related Signals. P. TSCHELIESNIG, G. LAKNER, M. GORI, H. VALLEN, B. HERRMANN. Varios. Europa. 2002.
- [9] – Acoustic Emission Testing of Flat Bottomed Storage Tanks: how to condense aquired data to a reliable Statement regarding floor condition. G. LAKNER, P. TSCHELIESNIG. TUV Austria, Viena. Austria. 2002.
- [10] – Modern Inspection Methodologies for RBI Programs of Atmosferic Storage Tanks. Dimitrios PAPASALOUROS, Konstantinos BOLLAS, Dimitrios KOUROUSIS, Nikolaos TSOPELAS, Athanasios ANASTASOPOULOS. Mistras Group Hellas. Athens. Grecia. 2014.
- [11] – Field Testing of Flat Bottomed Storage Tanks with Acoustic Emission - A review of Gained Eperience. G. LAKNER, P. TSCHELIESNIG. TUV Austria, Viena. Austria. 2005.
- [12] – ASME Boiler and Pressure Vessel Code, Section 5, Article 12 A. American Society of Mechanical Engineers. Estados Unidos. 2015.
- [13] – Quantitative Study of Acoustic Emission due to Leaks from Water Tanks. K. MOROFUJI, N. TSUI, M. YAMADA, A. MAIE, S. YUYAMA, Z. W. Li. Varios. Japón. 2003.

ESTUDIO DE LA TRANSFORMACIÓN MARTENSITICA EN ACERO AISI 321 MEDIANTE TÉCNICAS MAGNÉTICAS, RESULTADOS PRELIMINARES

Neyra Astudillo M. R.^(1,2), Gómez M.P.^(1,3) y Pardal J.⁽⁴⁾

⁽¹⁾Dpto. Coordinación Proyecto ICES, Gerencia Desarrollo Tecnológico y Proyectos Especiales, Gerencia de Área Investigaciones y Aplicaciones No Nucleares, Centro Atómico Constituyentes, Comisión Nacional de Energía Atómica, ARGENTINA.

⁽²⁾Departamento de Eléctrica, Fac. Reg. Delta, Universidad Tecnológica Nacional (UTN), ARGENTINA.

⁽³⁾Grupo de Emisión Acústica y Departamento de Ingeniería Mecánica, Fac. Reg. Delta, UTN, ARGENTINA.

⁽⁴⁾Departamento de Ingeniería Mecánica, Universidad Fluminense, BRASIL.

e-mail: neyra@cnea.gov.ar

RESUMEN

El Ruido Magnético Barkhausen (RMB) y la Emisión Magneto Acústica (EMA), son técnicas de Ensayos No Destructivos (END) muy sensibles a la microestructura, a las tensiones residuales y a la deformación de los materiales ferromagnéticos. El RMB se origina por el movimiento de las Paredes de los Dominios Magnéticos (PDM) cuando se somete el material a un campo magnético producido a partir de una corriente eléctrica lenta y cíclicamente variable. Este movimiento produce principalmente dos respuestas tipo ruido, una magnético (RMB) detectable con una bobina colectora sobre la superficie del material y otra ondulatoria elástica que puede detectarse colocando un sensor receptor de ultrasonido (EMA). Tanto el RMB como la EMA son alternativas tecnológicas eficaces y de bajo costo de implementación, que pueden utilizarse para el estudio de la degradación de materiales ferromagnéticos, que sufran deformación plástica, presencia excesiva de inclusiones, configuraciones de tensiones residuales perjudiciales, etc. Estos métodos de END aún están bajo estudio y puesta a punto para muchos casos específicos. En este trabajo se estudia el fenómeno de la transformación martensítica por deformación en un acero inoxidable austenítico AISI 321 (no magnético) a partir del comportamiento magnético de la martensita. El objetivo de este análisis es relacionar el grado de respuesta del RMB y de la EMA con los distintos porcentajes de deformación plástica y la cantidad de fase martensítica transformada para el acero estudiado. Para esto, en la parte experimental, se ensayaron probetas normalizadas en una máquina de tracción uniaxial, midiéndose en simultaneo el RMB y la EMA producidos. Se presentan y comparan los resultados obtenidos para ambos métodos durante el proceso de transformación de fase por deformación, intentando cuantificar la evolución del producto de la misma durante cada ensayo.

Palabras Clave: Aceros, Deformación plástica, Transformación de fase, RMB, EMA.

1. Introducción

Los aceros inoxidable austeníticos (AIA) se usan ampliamente en aplicaciones de ingeniería que requieren buena resistencia a la corrosión, soldabilidad y propiedades mecánicas. La gran cantidad de elementos de aleación estabilizantes de austenita como Mn, Ni o N en concentraciones suficientes preserva la fase de austenita (fcc) a temperatura ambiente. Junto con su buena resistencia a la corrosión, este material tiene una alta ductilidad, alcanzando hasta un 45% de deformación, lo que culmina en una alta aplicabilidad en procesos de formación mecánica. Este material es metaestable, lo que significa que la martensita puede formarse por deformaciones plásticas, y esta transformación depende de la composición química, el nivel de deformación, la temperatura y la tasa de deformación. Aunque los aceros inoxidable austeníticos son paramagnéticos, además de la martensita- α' , que se puede formar, en aceros comerciales otra fase ferromagnética, ferrita- δ a niveles inferiores al 3% se encuentran comúnmente en estos aceros. Esto permite utilizar técnicas magnéticas para la caracterización de la transformación de fase de los materiales [García de Campos, 2019].

El ruido magnético de Barkhausen (RMB) es una técnica no destructiva basada en el efecto Barkhausen, que son pulsos magnéticos generados en respuesta del movimiento de las Paredes de los Dominios Magnéticos (PDM) cuando el material está sujeto a un campo magnético oscilante. Se sabe que el RMB es sensible a diversos materiales y propiedades mecánicas, como el tamaño de grano, dureza, estado de tensión y deformaciones [D. Jiles, 1995]. El movimiento de las PDM también origina ondas elásticas de baja intensidad en el rango del ultrasonido llamadas Emisión Magneto Acústica (EMA) [K. Ono, 1999, Shibata M., Ono K., 1981, Augustyniak B. et al. 1998]. Hay pocos estudios reportados en la literatura que relacionen RMB con martensita inducida por deformación en AIA. Meszaros I. et al. (1996, 2005), investigaron en muestras de AISI 304, la aparición de la transformación por deformación de la fase de martensita α' debido al laminado en frío y por los tratamientos térmicos de recocidos usando diferentes técnicas: RMB, polarización de saturación, fuerza coercitiva, dureza y medidas de espectros de Mössbauer de electrones de conversión. En la continuación de su trabajo, demostró que el tipo y la tasa de deformación influyen fuertemente en la cantidad de fase martensita α' . La cantidad de martensita α' , debido a la deformación plástica, puede ser significativa. O'Sullivan D. et al. (2004), investigaron la transformación de fase martensítica. Utilizaron muestras rectangulares de acero SS304. Determinaron el valor RMS del RMB y lo utilizaron para caracterizar los cambios microestructurales en el material. Concluyeron que el RMB es una herramienta efectiva para estudiar la transformación de austenita-martensita, pero no resultó un medio eficaz para caracterizar el endurecimiento del acero inoxidable austenítico. Sagar et al. (2005) estudiaron la evolución de la textura en la laminación AISI 304 usando RMB. Kleber y Barroso (2010) estudiaron la formación de α' en aceros AISI 304L sometidos a granallado. Ahmadzade Beiraki E. et al (2016), investigaron en muestras de AISI 304, la transformación martensítica utilizando diferentes parámetros del RMB: el valor RMS, la altura del pico máximo y el ancho de la envolvente. El valor RMS y la altura del pico máximo aumentaba con la deformación, esto se atribuyó a la fracción de volumen de los dominios magnéticos y al incremento de sitios de anclaje con el aumento del contenido de

martensita. Se sugirió que el crecimiento de las agujas de martensita, producía áreas más amplias para el movimiento de las PDM y su interacción con los obstáculos dentro de la martensita, resultando en un incremento de la velocidad de cambio en los valores RMS y en el ancho de la envolvente del RMB, con el contenido de martensita. Sin embargo, la coalescencia de las agrupaciones de martensita disminuía el número de señales de RMB siendo emitidas a partir de las áreas de interface austenita-martensita, lo que resultaba en una disminución de la pendiente de la curva de la altura de pico con el aumento del contenido de martensita. De la técnica de EMA aplicadas a la transformación de fase no se han encontrados estudios en la literatura.

En este trabajo se presentan los resultados preliminares de la utilización de las técnicas de RMB y EMA durante el proceso de transformación de fase austenita a martensita que resulta como consecuencia de la deformación plástica por ensayos de tracción uniaxial en el AISI 321. Este acero tiene como principal característica poseer titanio (Ti) como elemento estabilizador. Para el análisis de las señales del RMB se estudió el parámetro del valor RMS.

2. MÉTODOS O DESARROLLO EXPERIMENTAL

2.1. Materiales

El material estudiado fue acero AISI 321 cedido gentilmente por la empresa Arcelor Mittal de Brasil (Ex ACESITA). Todas las muestras estudiadas se obtuvieron de 2 placas, (dimensiones originales de 300,0 mm x 300 mm x 2.54 mm) una cortada en el sentido de laminación (0°) y otra en el sentido perpendicular al de la laminación (90°). Se fabricaron 24 probetas según la Norma ASTM E8-04. En la figura 1 se muestran las fotografías de las placas, mostrando el diagrama de cortes de las probetas a) 90° y b) 0° .

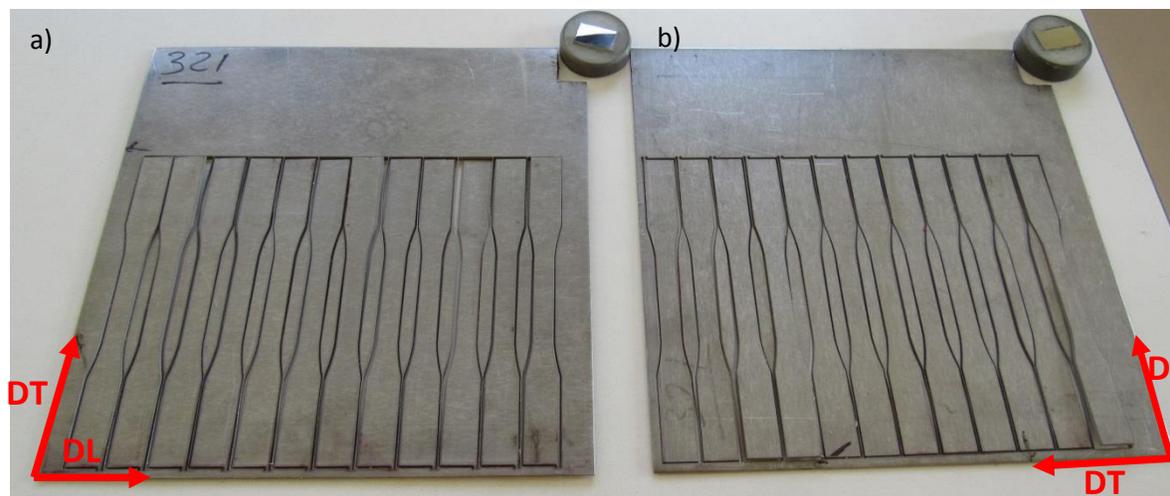


Figura 1. Fotografía de las placas, mostrando el diagrama de cortes de las probetas a) 90° y b) 0° .

Para este estudio solo se utilizaron 6 probetas: 3 en la dirección 0° y 3 en 90°. En la Figura 1 se muestra como ejemplo una fotografía de una de ellas y en la Tabla 1 se muestra su composición química.

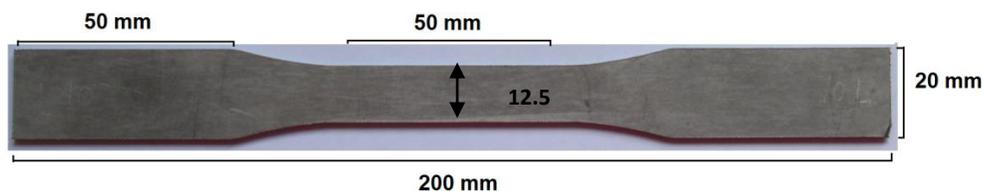


Figura 2. Dimensiones de la probeta.

Tabla 1. Composición química del acero AISI 321

Elemento	C	Co	Cr	Mn	Mo	N	Nb	Ni	P	S	Si	Sn	Ti	V	W	Ti/(C+N)
% peso	0.0089	0.053	17.048	0.0216	0.08589	0.0105	0.0046	9.0511	0.0298	0.0043	0.5455	0.0035	0.1258	0.0265	0.0163	6.5

2.2 Caracterización Microestructural

Después del desbaste, y una vez obtenida una superficie especular, esta fue atacada electrolíticamente con ácido oxálico al 10 % con una tensión de 10 V durante un tiempo de 2 min. En la Figura 2 se muestra la estructura del acero AISI 321, para una probeta sin deformar, se observa una estructura austenítica con granos equiaxiales con una variación en el tamaño de grano entre 10 μm y 100 μm , con leve precipitación de carburos y maclas de recocido. Para verificar la presencia de fase magnética en la probeta sin deformar, se midió por el Método de Inducción Magnética la presencia de martensita, dando un valor 0.9 %. Esto se podría atribuir al proceso de laminación inicial.



Figura 3. Fotografía de la microscopía óptica de la probeta sin deformación. La flecha roja indica el sentido de laminación.

2.2 Deformación plástica

Las probetas fueron ensayadas en una máquina de tracción marca Shimadzu de 100 kN de carga máxima, sujetándolas en sus extremos por mordazas, y sometiéndolas a un aumento de tensión progresivo. Los ensayos de deformación plástica se llevaron a cabo a temperatura ambiente, con una velocidad de deformación de 1 mm/min. Para obtener las propiedades mecánicas de cada material, se realizaron ensayos de tracción hasta la rotura a una probeta para cada dirección de laminación (a 0° y 90°). En la Tabla 2 se muestran los valores calculados de las propiedades mecánicas del acero inoxidable estudiado.

Luego se ensayaron para diferentes etapas de carga tres probetas de 0° y dos de 90°, posteriormente se midió el RMB y la EMA. En la Figura 4a) se muestran las curvas superpuestas de carga vs. alargamiento reales para 0° y 90° y b) la reconstrucción de las curvas de las 6 etapas del ensayo de tracción uniaxial para 0°. Se observa que las curvas carga vs. alargamiento para 0° y 90° no presenta mayores diferencias. En la Tabla 3 se muestran los valores de carga aplicada y el alargamiento para cada probeta ensayada.

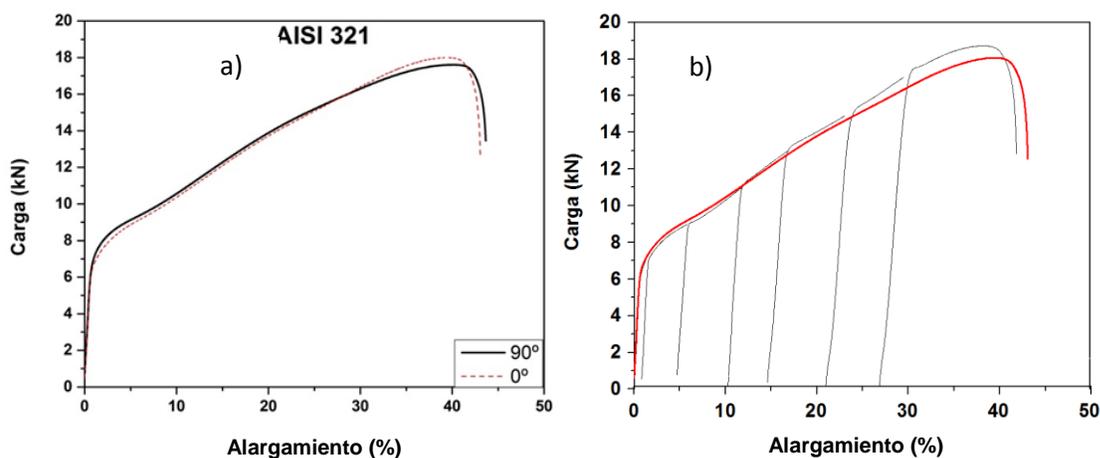


Figura 4. Curvas superpuestas carga vs. alargamiento reales para a) 0° y 90° y b) reconstrucción de las curvas carga vs. alargamiento para 0°.

Tabla 2. Propiedades mecánicas del AISI 321

AISI 321	Límite de proporcionalidad σ_y (MPa)	Fluencia σ_s (MPa)	Rotura σ_f (MPa)
0°	243	272	694
90°	247	290	682

2.3 Medicion de la martensita

Para verificar la presencia de fases magnéticas, se usó el Método de Inducción Magnética, con un Ferrideltímetro marca Fischer, modelo: Feritscope FMP30, Sonda Modelo: FGAB 1.3-Fe. Las mediciones se realizaron antes y después de ensayadas las probetas en la máquina de tracción. Se midió el porcentaje de martensita en la parte central de las 6 probetas. En la Tabla 3 se muestra los valores de carga aplicada, alargamiento y el porcentaje martensita para cada probeta. Se observa el aumento de la martensita con el aumento de la carga aplicada. Comparando las probetas de 0° con las de 90°, a igual carga y hasta un valor de 9 kN, se observa que para las primeras se obtiene aproximadamente el doble porcentaje de martensita que para las otras. El valor máximo del porcentaje de martensita que alcanzó a medir el ferrideltímetro fue de 62%. Talone et al (2004) en muestras de AISI 304 obtuvo una fuerte correlación lineal hasta un 55 % , tal como se observa en la Fig. 5

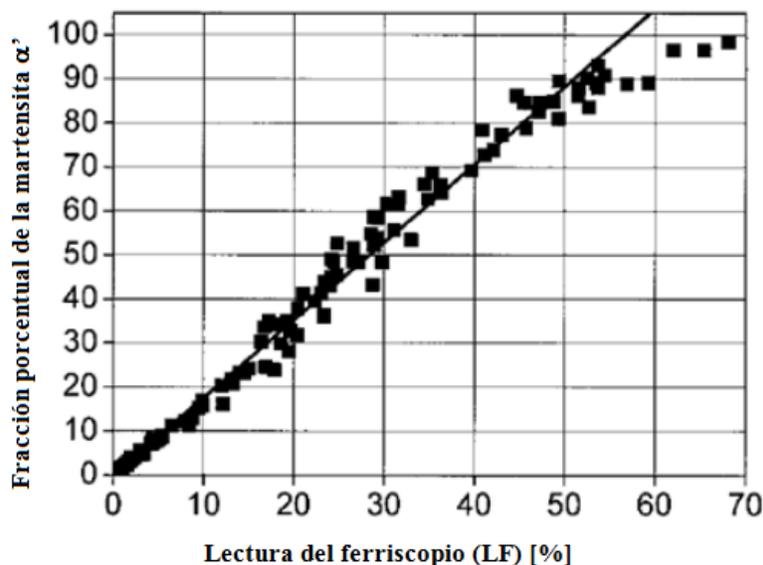


Figura 5. Lectura de ferriscopio (LF) en función del contenido de martensita obtenido por equilibrio magnético (*Adaptada de TALONEN et al., 2004*).

Tabla 3. Valores de carga aplicada, alargamiento y martensita para cada probeta.

Probetas	Carga (kN)	Alargamiento (mm)	Martensita (%)	Probetas	Carga (kN)	Alargamiento (mm)	Martensita (%)
0°-1	0	0	0.94	90°-1	0	0	0.72
	7	1.50	5.58		7	0	4.44
	9	7.40	58.26		9	4.94	35.28
	11	13.00			11	12.14	
	13	16.84			13	16.88	
	15	19.40			15	19.64	
	17	23.80			17	24.06	
	19 (rotura)	42			19 (rotura)	40.68	
0°-2	0	0	0.80	90°-2	0	0	0.78
	7	0.86	5.20		7	2.36	4.24
	9	7.08	62.62		9	7.24	28.63
	11	12.06			11	12.60	
	13	17.02			13	17.44	
	15	19.44			15	21.32	
	17	22.70			17	24.86	
	19 (rotura)	41.78			19 (rotura)	44.70	
0°-3	0	0	0.94	90°-3	0	0	0.82
	7	1.32	5.40		7	5.48	3.98
	9	7.60	59.80		9	8.40	36.47
	11	13.60			11	13.00	
	13	17.10			13	12.96	
	15	20.40			15	16.60	
	17	23.38			17	20.68	
	19 (rotura)	42.16			19 (rotura)	43.58	

2.4. Ruido Magnético Barkhausen y Emisión Magneto Acústica

Una onda sinusoidal de 10 Hz producida por un generador de funciones LeCroy ARB Studio 1102 con amplitud de 1,5 V, incrementada a través de un amplificador de potencia especialmente diseñado excitaba la bobina del solenoide, donde se introducía la probeta a estudiar. La intensidad de corriente máxima fue de 0,3 A, medida en una resistencia de 10 Ohm en serie con el solenoide. El sensor RMB se conectaba a un amplificador con una banda de paso [1-500] kHz con bajo nivel de ruido. Para capturar la EMA, se utilizó un canal de Emisión Acústica (EA), un canal con un sensor resonante (200 kHz, Micro-30D, serie 922) con un pre-amplificador de 40 dB. Se utilizó un medio de acoplamiento adecuado entre cada sensor de EA y la superficie de la probeta. La bobina colectora del RMB se ubicaba en la zona central de la probeta y el de EA en la parte posterior de la probeta. La dirección del campo producido por el solenoide es paralelo a la dirección de la deformación de la probeta. Después de cada etapa de deformación plástica, se hicieron los ensayos de RMB y la EMA en cada una de las 6 probetas deformadas. Todas las señales fueron registradas en un osciloscopio digital LeCroy con la siguiente configuración, canal 1: RMB; canal 2: EA, canal 3: tensión eléctrica en la resistencia de 10 Ohm. En la Fig. 6 a) y b) Detalle de la posición de los sensores, c) Fotografía del sistema de medición y en la Figura 7. El esquema del sistema de medición experimental.

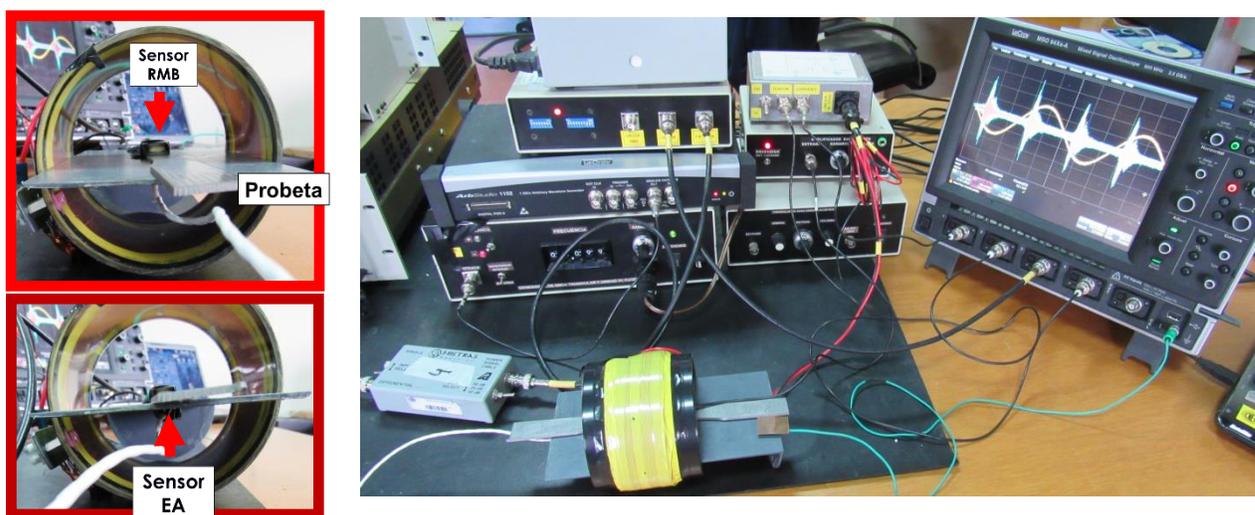


Figura 6. a) y b) Detalle de la posición de los sensores, c) Fotografía del sistema de medición

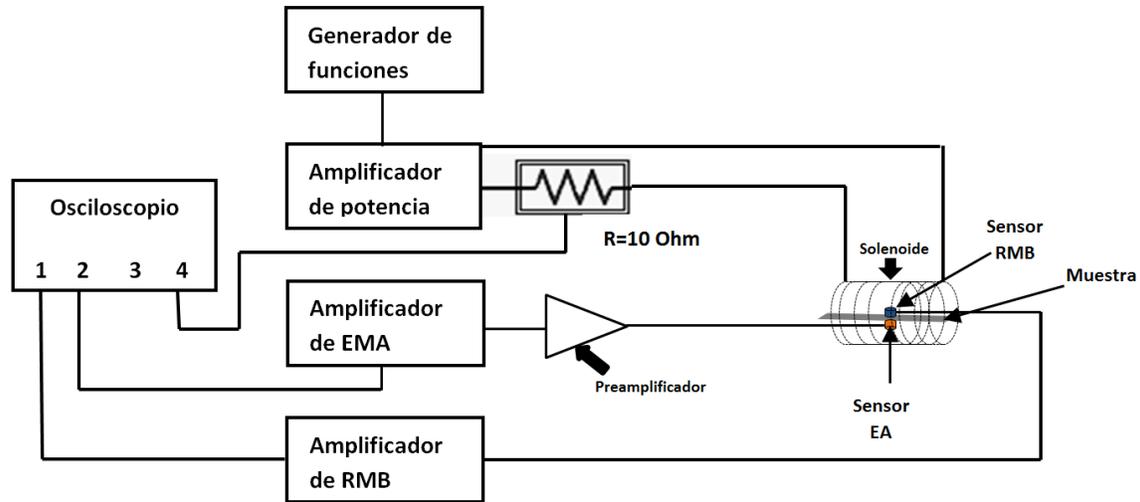


Figura 7. Esquema del sistema de medición experimental.

3. Resultados y discusión

Para cada probeta, por cada aumento de carga, se registraron 3 señales: el RMB; la EMA y la tensión de excitación, para los casos de laminación a 0° y 90° , registrados para cada etapa de deformación. En todos los casos se analizaron las señales de RMB y EMA correspondientes a medio ciclo de excitación. La digitalización se realizó con una frecuencia de muestreo de 2,5 MSamples/s. En la Figura 8 se presentan el resultado obtenido en la evolución temporal del RMB de la probeta 0° -1, después de haber sido filtrada. Se utilizó filtro pasabanda de tipo Butterworth, de orden 4, con una banda de paso de 5 kHz-200 kHz.

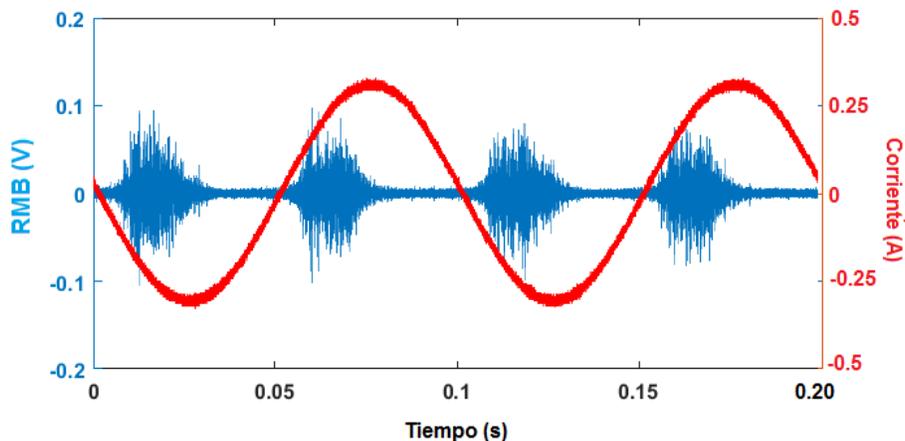


Figura 8. Esquema del sistema de medición experimental.

Las muestras tal como se recibieron mostraron una cantidad significativa en la actividad de RMB, esto se pudo corroborar con el ferrideltimetro. En la Figura 9 se muestra un ejemplo para la probeta 0° -1, en distintos instantes del ensayo conforme aumentaba la

carga y simultáneamente el RMB. El mismo comportamiento se observó en todos los ensayos. Así, la actividad de RMB aumentaba a partir de la carga creciente. Finalmente para una carga de aproximadamente 19 kN, justo antes de la rotura, se produjo la mayor señal de RMB. Claramente, esta actividad de aumento de RMB se debe al crecimiento de la fase martensítica (magnética) originada por el aumento de la deformación [Neyra et al., 2010].

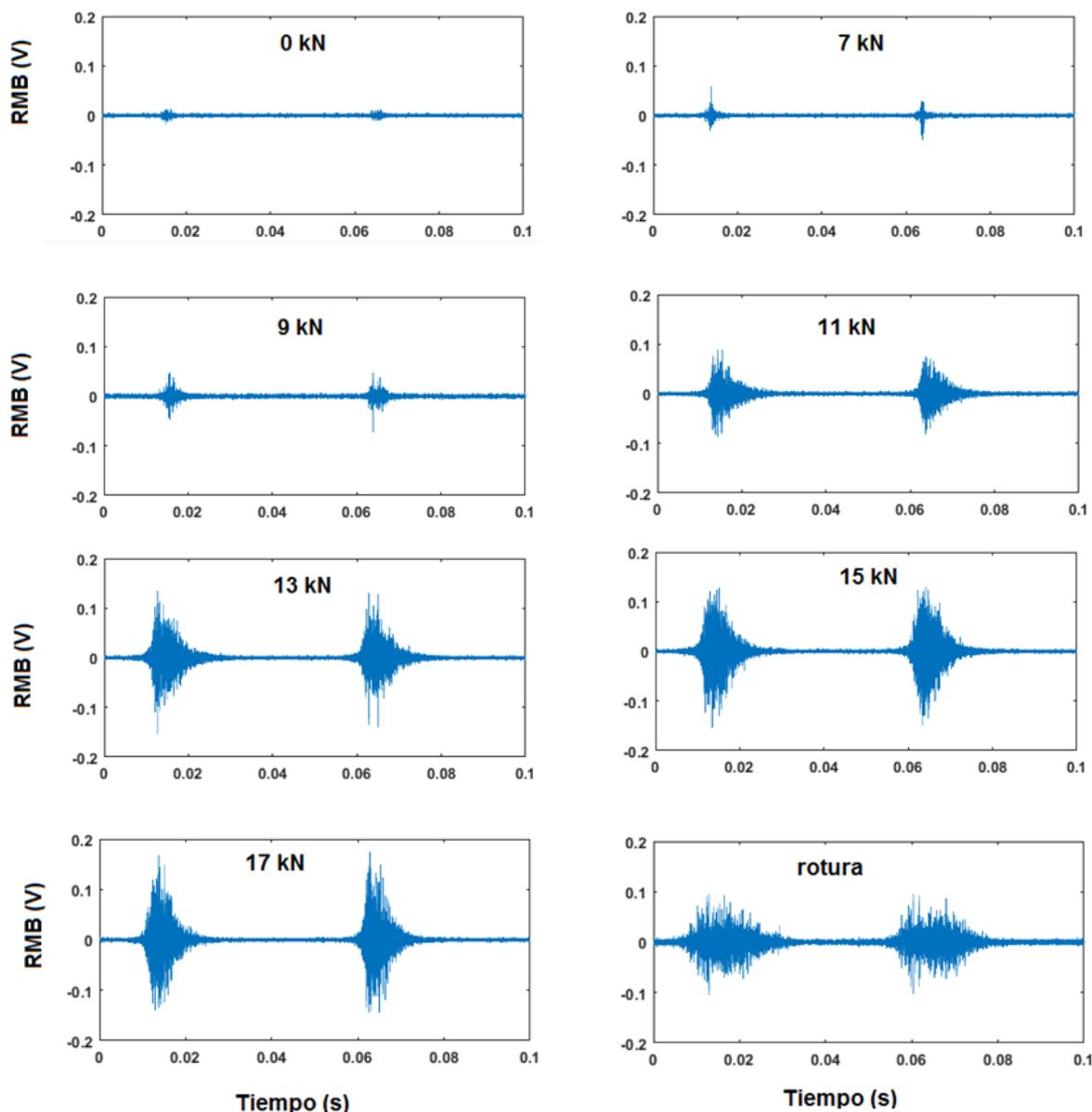


Figura 9. Señales de RMB para las diferentes cargas, probeta 0°-1.

Debido a la repetitividad de los resultados de las probetas ensayadas, sólo se presentan los de las probetas 0°-1 y 90°-1. En la Figura 10 a) y b) se muestran para estas probetas, las señales superpuestas del RMB en función del tiempo, para medio ciclo de

excitación y para diferentes cargas aplicadas. Se destaca el incremento de la amplitud de las señales con la carga creciente.

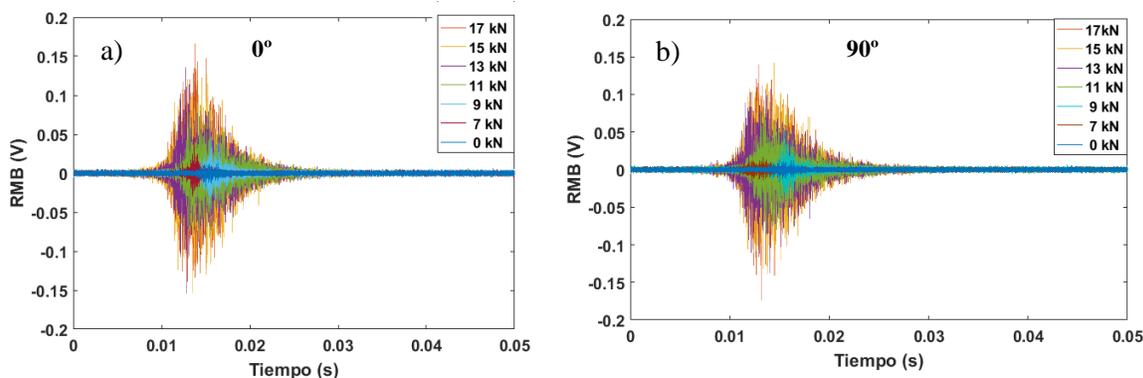


Figura 10. Señales superpuestas de RMB para los diferentes aumentos de carga, probeta a) 0° -1 y b) 90° -1

En la Fig. 10 a) y b) se observa un crecimiento en el ancho y la amplitud del pico con el aumento de la carga aplicada, es decir a medida que aumenta la transformación martensítica inducida por deformación, aumenta el RMB. Para deformaciones a mayores cargas, el RMB comenzó a manifestar su pico de máxima amplitud a menores corrientes de excitación, relacionándose esto al incremento del porcentaje de martensita por deformación.

En la Fig. 11 (a) y (b) se muestran los valores RMS del RMB en función de la carga para cada una de las probetas, en las dos direcciones (0° y 90°). En los dos gráficos se puede observar claramente que el valor RMS crece al aumentar la carga (deformación) y por lo tanto la martensita, para la carga (17 kN) se produce una disminución y luego para carga de rotura (19 kN) el valor RMS no se repite, esto se podría deber al tipo de fractura y a que la probeta se divide en dos. Esto se podría explicar que las interfaces austenita-martensita puede ser consideradas como fuertes puntos de anclaje de las PDs. Las transformaciones martensíticas tienen lugar a través de mecanismos de nucleación homogénea, que se da preferencialmente en bordes de grano y/o defectos con un posterior crecimiento de la fase previamente nucleada. La nucleación implica la formación de embriones de martensita dentro de la matriz. Estos embriones, en condiciones de temperatura y esfuerzo adecuados, alcanzan un tamaño crítico, que les permite crecer. Además los bordes de grano son sitios densos de fijación y liberación repentina de PDs. que generan un gran pico en el perfil del RMB. A medida que la martensita aumenta con la deformación en frío, la fase austenítica va disminuyendo conjuntamente; las interfaces están constituidas por un plano denominado plano de hábito. El proceso de crecimiento de la martensita genera defectos cristalinos como las dislocaciones y un aumento en la magnetización total, lo que indica un aumento de la magnetización de saturación y de remanencia, generando un aumento en los valores de RMS del RMB [Neyra Astudillo M. R. 2018].

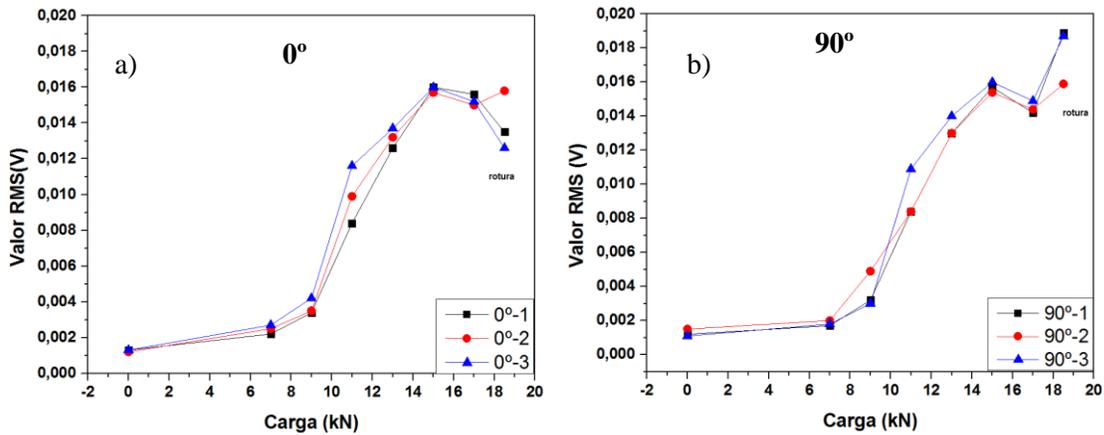


Figura 11. Valor RMS del RMB en función de la carga aplicada, (a) para 0° y (b) para 90°.

Esta parte del trabajo se analiza las señales de EMA medidas en las mismas condiciones que el RMB. En la Figura 12 se presenta el resultado obtenido en la evolución temporal de la EMA, para dos ciclos de excitación. Se utilizó filtro pasabanda de tipo Butterworth, de orden 4, con una banda de paso de 60 kHz-1000 kHz.

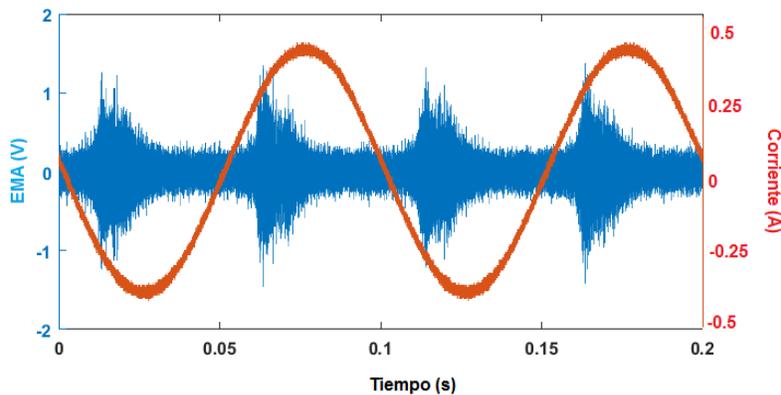


Figura 12. Señal EMA en función del tiempo.

Las placas en las condiciones recibidas no presentaron EMA detectable, a pesar del contener 0,9 % de martensita debido al proceso de laminado inicial. Esto podría deberse por la forma y espesor de la probeta y la forma de excitar a la muestra. En todos los ensayos, las señales de EMA comenzaron a aparecer a partir de una carga del orden de 11 kN. En la Figura 13 se muestra un ejemplo para la probeta 0°-1, en distintos instantes del ensayo conforme aumentaba la carga y simultáneamente la EMA. Finalmente para una carga de aproximadamente 19 kN, justo antes de la rotura, se produjo la mayor señal de EMA.

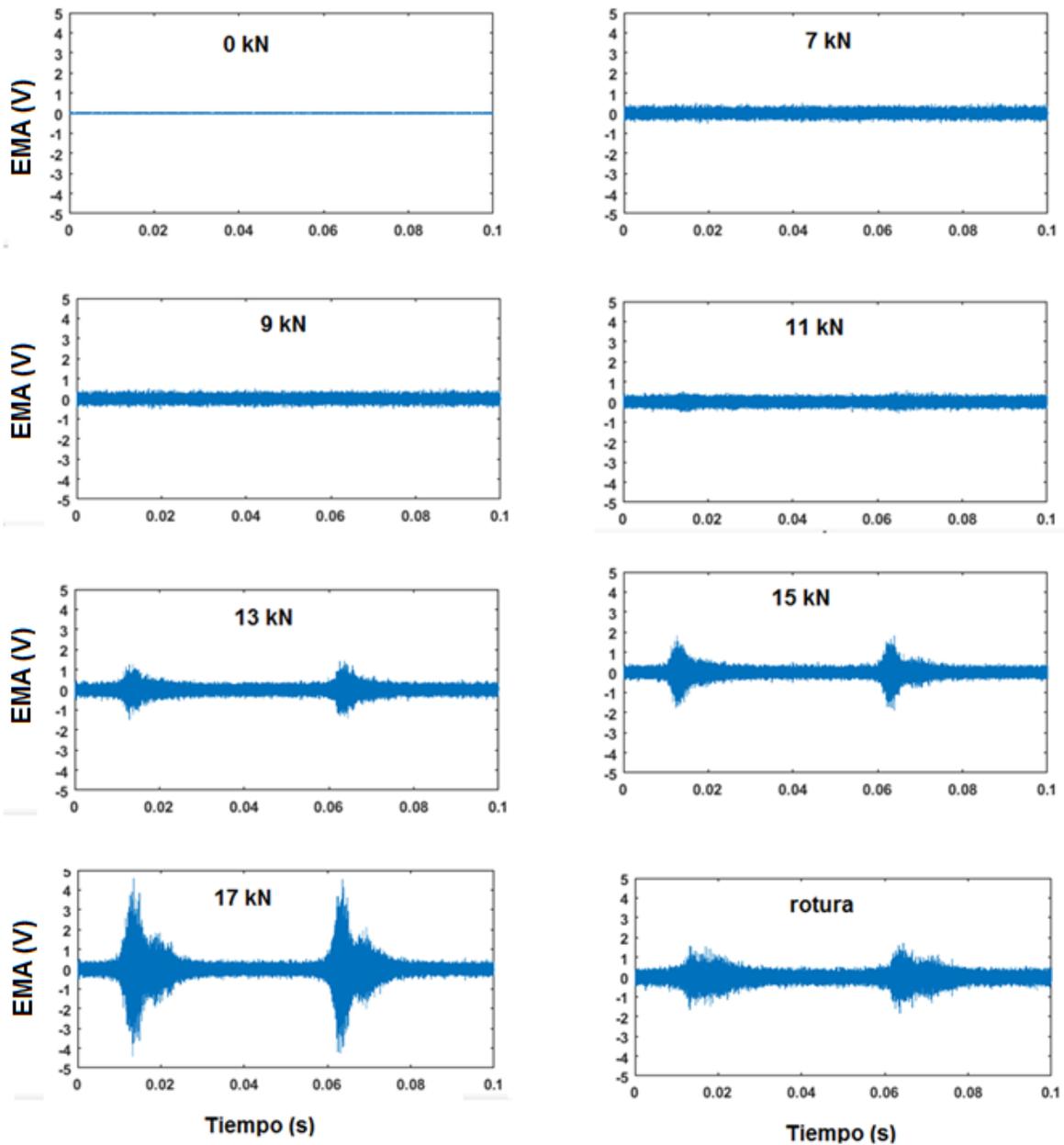


Figura 13. Señales de EMA para las diferentes cargas, probeta 0°-1.

En la Figura 14 se muestran para 0°-1 y 90°-01, las señales superpuestas de la EMA en función del tiempo para medio ciclo de excitación y para diferentes cargas.

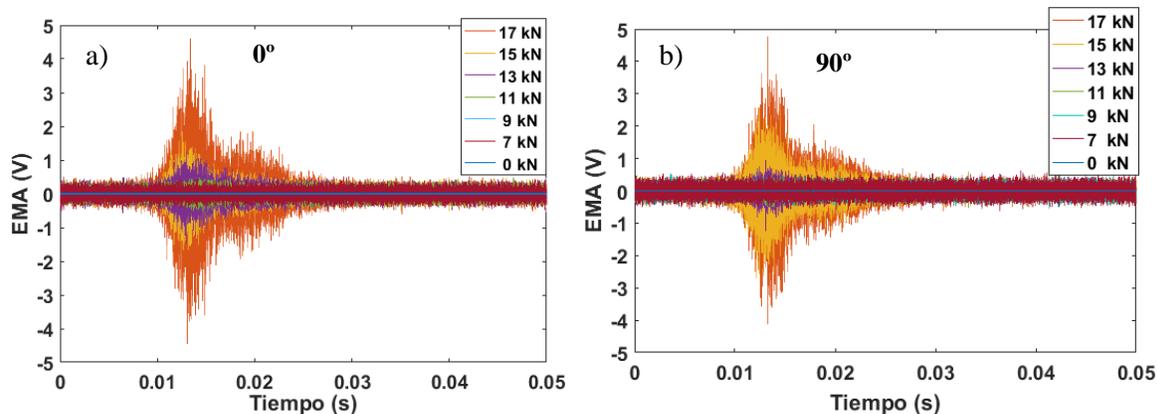


Figura 14. Señales superpuestas de EMA para los diferentes aumentos de carga, probeta a) 0°-1 y b) 90°-1

De la Figura 14 para a) y b) a partir de la carga aplicada de 11 kN, se observa el mismo efecto que el RMB, un crecimiento en el ancho y la amplitud del pico con el aumento de la carga aplicada, es decir a medida que aumenta la transformación martensítica inducida por deformación, aumenta el EMA. El RMB mostro ser más sensible que la EMA, la sensibilidad de la técnica se podría deber a que es una técnica superficial (Parakka et al (1997)). En comparación con el RMB, la EMA tienen una mayor profundidad de penetración del flujo magnético y, por lo tanto, nos dar mayor información de todo el volumen de las probetas durante la deformación.

Durante el proceso de magnetización se producen cambios microscópicos en la deformación debido a la magnetostricción, cuando se produce el movimiento irreversible de las PDs. Estos cambios microscópicos en la deformación producen ondas elásticas generando la EMA [Neyra Astudillo et al. (2015)]. En el presente caso, la magnitud del efecto magnetoestrictivo no fue suficiente para generar EMA hasta una carga mayor de 9 kN. Yamasaki et al (1996) propusieron que la orientación del dominio y los cambios iniciales de magnetostricción no están significativamente influenciados por los bajos esfuerzos de tensión. Durante la carga de tracción inicial, el esfuerzo uniaxial conduce a la generación de martensita en muestras recibidas y trabajadas en frío. En esta etapa de deformación, hubo un aumento en la densidad numérica de pequeñas islas de martensita formadas en todo el volumen del material. Por eso no se pudo detectar EMA. Para mayores deformaciones el crecimiento, el aumento del tamaño y la densidad de las islas martensíticas, aumentando la cantidad de dominios magnéticos martensíticos y por consiguiente de paredes que se mueven, generando mayor energía elástica y por ende mayor EMA.

En la Fig. 15 (a) y (b) se muestran los valores RMS de la EMA en función de la carga, para cada una de las probetas, en las dos direcciones (0° y 90°). En las dos gráficas, se puede observar que hasta 9 kN no hay evidencia de transformación para la EMA. Para cargas mayores de 11 kN, se aprecia claramente que el valor RMS crece al aumentar la deformación y por lo tanto la cantidad de martensita. El valor máximo de RMS se observa en las probetas de 0°, tal como se observó con el ferrideltimetro.

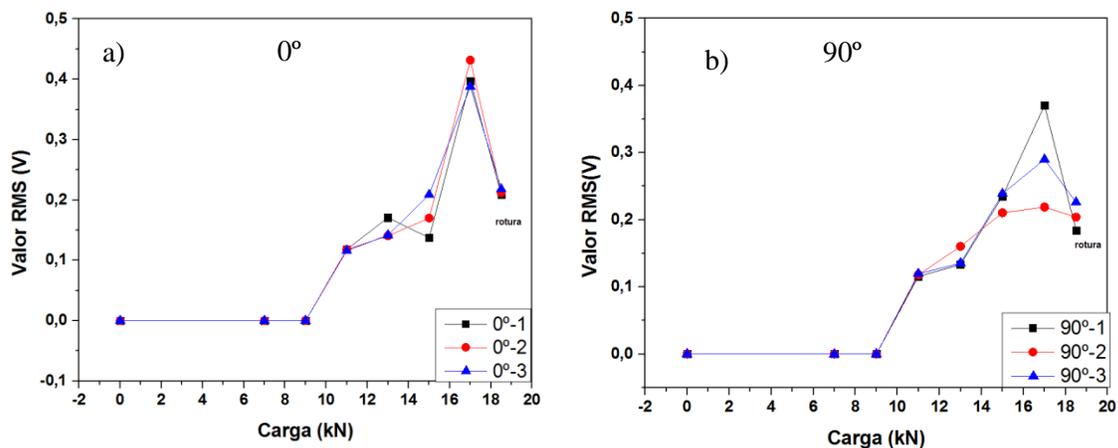


Figura 15. Valor RMS de la EMA en función de la carga aplicada, (a) para 0° y (b) para 90° .

4. Conclusiones

Se investigó la influencia de la martensita formada mediante la deformación en frío con el RMB y la EMA durante la carga de tracción uniaxial de muestras de acero AISI 321. El RMB resultó ser más sensible que la EMA, porque detectó a menores cargas la presencia de martensita. La magnitud del efecto magnetoestrictivo no fue suficiente para generar EMA hasta una carga mayor de 9 kN. Esto concuerda con Yamasaki et al (1996) quienes propusieron que la orientación del dominio y los cambios iniciales de magnetostricción no están significativamente influenciados por los bajos esfuerzos de tensión.

Para deformaciones a mayores cargas, el RMB comenzó a manifestar su pico de máxima amplitud a menores corrientes de excitación, relacionándose esto al incremento del porcentaje de martensita por deformación. Comparando los valores finales del RMB para las orientaciones de laminación de 0° y 90° no se observaron diferencias.

Después del proceso de deformación, se verificó la presencia de la fase magnética martensítica con el Método de Inducción Magnética, utilizando un Ferrideltímetro. Se observó el incremento del porcentaje de martensita con el aumento de la carga aplicada. Comparando las probetas de 0° con las de 90° , a igual carga y hasta un valor de 9 kN, se observa que para las primeras se obtiene aproximadamente el doble porcentaje de martensita que para las otras. El valor máximo del porcentaje de martensita que alcanzó a medir el ferrideltímetro fue de 62%. Talone et al (2004) en muestras de AISI 304 obtuvo una fuerte correlación lineal hasta un 55 % a partir del cual el ferrideltímetro pierde esa correspondencia.

El valor RMS del RMB permitió detectar el inicio de la transformación martensítica durante el proceso de deformación y también permitiría estimar el porcentaje de martensita que se crea en función del tiempo. Esto se pudo verificar con el ferrideltímetro hasta una carga de 9 kN. A medida que aumenta la carga aplicada aumenta el valor RMS y el porcentaje de martensita.

5. Referencias

Ahmadzade Beiraki E., Mazinani M. and Kashefi M., Examination of Barkhausen noise parameters for characterisation of strain-induced martensitic transformation in AISI 304 stainless steel, *Insight*, V. 58, N° 6, 2016.

Augustyniak B., Chmielewski M., Piotrowski L., Kowalewski Z.; Comparison of Properties of Magnetoacoustic Emission and Mechanical Barkhausen Effects for P91 Steel After Plastic Flow and Creep, *IEEE Transactions on Magnetics*, V. 44, Issue: 11, 2008, pp. 3273 – 3276.

Garcia de Campos Victor Hugo, Caracterização e Monitoramento da Martensita Induzida por Deformação no Aço AISI 304L Através do Ruído Magnético de Barkhausen, Dissertação de Mestrado, Universidade Estadual de Campinas Faculdade de Engenharia Mecânica, Brasil, 2019.

Jiles D., *Introduction to Magnetism and Magnetic Materials*, Chapman and Hall, 1995.

Kleber X., Barroso Soraia Pirfo, Investigation of shot-peened austenitic stainless steel 304L by means of magnetic Barkhausen noise, *Materials Science and Engineering A* 2010, 527:21-22.

Mészáros I. and Prohászka J., Magnetic investigation of the effect of α' martensite on the properties of austenitic stainless steel, *Journal of Materials Processing Technology*, 2005, V. 161, pp. 162-168.

Meszaros L., Kaldor M., Hidasi B., Vertes A., and Czako-Nagy I., Micromagnetic and mössbauer spectroscopic investigation of strain-induced martensite in austenitic stainless steel, *Journal of Materials Engineering and Performance*, 1996, V. 5, N° 4, pp. 538–542.

Neyra Astudillo Miriam Rocío, Núñez Nicolás , López Pumarega María Isabel, Ruzzante José , Gómez Martín, Ferrari Guido, Rodrigues Padovese Linilson, Análisis de Ruido Magnético Barkhausen en acero AISI 304, 28° Congreso Internacional de Gestión de Ingeniería en el Monitoreo y Diagnóstico de Condiciones X Congreso Regional de Ensayos No Destructivos, 2015.

Norma Internacional ASTM E8-04 Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials, 2004.

O'Sullivan D., Cotterell M., Meszaros I., The characterisation of work-hardened austenitic stainless steel by NDT micro-magnetic techniques, *NDT&E International*, 2004, V. 37, pp. 265–269.

Ono K., “Magneto-Acoustic”, ISSN1515-615X, Actas Primer Encuentro del Grupo Latinoamericano de Emisión Acústica, E-GLEA 1, pp.147-161, 6-10, Septiembre, 1999.

Sagar S. Palit, Kumar B. Ravi, Dobmann G., Bhattacharya D.K., Magnetic characterization of cold rolled and aged AISI 304 stainless steel, *NDT&E International* 38 (2005) 674–68.

Shibata M., Ono K., “Mae- New method for Nondestructive Stress Measurement”, NDT International, 1981, vol. 5, pp.277-234.

Stefanita C. G., From Bulk to Nano The Many Sides of Magnetism, Springer Series in Materials Science, 2008.

Talone, J.; Aspegren, P.; Hannien, H. Comparison of different methods for measuring strain induced α' - mattsensite content in austenitic steels. Materials Science and Technology, Vol 20, 2004.

Parakka A. P., Jiles D. C., Gupta H., and Zang M., *Barkhausen effect in steels and its dependence on surface condition*, J. Appl. Phys. 81 (1997) pp. 5085 – 5086.

Yamasaki T., Yamamoto S., and Hiro M., *Effect of applied stresses on magnetostriction of low carbon steel*, NDT & E. 29 (1996) pp. 263 – 268.

6. Agradecimientos

A la empresa Arcelor Mittal de Brasil (ex Acesita) por la gentileza que tuvieron al cedernos placas de acero AISI 321.

A Aníbal Rodríguez y a Pablo Vogt, por los ensayos de tracción uniaxial, Gerencia de Área Energía Nuclear (GAEN) y a la Gerencia de Investigación y Aplicaciones, GAYANN, CAC, CNEA, Argentina.

A Guillermo Gerardo Cosarinsky, por las mediciones con el ferrideltmetro, Departamento Ensayos No Destructivos y Estructurales, Gerencia Desarrollo, Ensayos y Gestión de Vida, CAC, CNEA, Argentina.

PREDICCIÓN DE LA RESISTENCIA AL DESGASTE POR ABRASIÓN DE RECARGUES POR SOLDADURA A TRAVÉS DE EMISIÓN ACÚSTICA

Peix D.A.^a, Ávila E.^a, Molina G.^a, Ferrari G.^a, Folgueiras J.^b y Gomez M.P.^{a,c}

^a Departamento Mecánica – Grupo de Emisión Acústica, UTN FRD, ARGENTINA

^c Laboratorio de Óptica, UTN FRD, ARGENTINA

^b Departamento Proyecto ICES, Centro Atómico Constituyentes, CNEA, ARGENTINA

e-mail: dantepeix@yahoo.com.ar

RESUMEN

El conocimiento de la resistencia al desgaste por abrasión de distintos elementos de máquinas sometidos a sistemas tribológicos complejos puede ser de gran ayuda al diseño y rediseño de dichos elementos. También es una excelente herramienta para la programación de mantenimiento. La predicción de futuras fallas por desgaste abrasivo sería una herramienta de gran utilidad para el mantenimiento preventivo/predictivo de equipos con sus correspondientes ahorros y reducciones de costo. Para el estudio de resistencia al desgaste utilizamos una máquina bajo norma ASTM G65 para ensayos de abrasión. Para el monitoreo de la evolución del ensayo utilizamos una técnica no destructiva analizando los parámetros de la EA generada. Los ensayos se realizaron con probetas recubiertas con distintos recargues aportados por soldadura por arco. Los electrodos seleccionados son de uso frecuente en la industria para recargar piezas sometidas a la abrasión. La resistencia al desgaste se determinó por la tasa de pérdida de masa y los eventos de EA fueron detectados por sensores ubicados en el porta-probetas. Con el análisis de la señal de E.A. se intenta determinar una relación entre la misma y lo que sucede entre las dos piezas en contacto y el abrasivo.

Palabras Clave: Recargue, Resistencia a la abrasión.

1. INTRODUCCIÓN

En la industria existen muchos problemas relacionados al desgaste abrasivo en los componentes de máquinas, por ejemplo en transportadores a tornillos, uñas de palas cargadoras, palas de ventiladores, etc. A lo largo del tiempo se han probado distintas formas de calcular el desgaste como desarrollan Pérez-Oviedo y otros (2015) en su “Guía de diseño para calcular el desgaste abrasivo entre componentes no lubricados”. Este desgaste trae como consecuencia costos relacionados a paradas imprevistas de plantas, reducción de vida útil de equipos e incluso accidentes por fallas de elementos de máquinas. Es por ello que se han desarrollados distintas aleaciones resistentes al desgaste. Otra alternativa es una técnica muy utilizada en la que se recubren piezas de máquinas construidas con aceros estándar de construcción con materiales de alta dureza aportado por soldadura.

En el presente trabajo se evalúa la resistencia al desgaste de distintos recubrimientos a través de un ensayo de abrasión bajo Norma ASTM G65. Baranov y otros (2007), proponen que en la fricción ocurren varios fenómenos físico-químicos y entre ellos ocurre la generación de ondas elásticas en el rango de frecuencia del ultrasonido, que pueden ser estudiadas por el método de END denominado Emisión Acústica (EA). Es por esto que en los ensayos realizados en este

trabajo se monitorizó el fenómeno estudiado mediante EA relacionando las ondas generadas en el proceso con los resultados de desgaste y así poder entender los mecanismos intervinientes. De esta manera, se busca poder desarrollar una herramienta que permita predecir fallas de equipos en la industria.

En el mecanismo de desgaste por abrasión intervienen dos superficies, entre las cuales existe un movimiento relativo, una carga ejercida entre las dos superficies y la presencia de un tercer cuerpo que es el elemento abrasivo entre las dos superficies. Esto forma un sistema tribológico complejo adonde los resultados dependen de varios factores como, la carga, las propiedades de los cuerpos, la velocidad, la rugosidad, el caudal, y el tamaño y la dureza del abrasivo, entre otros.

Es por ello que siguiendo la norma ASTM G65 se seleccionó una modalidad de ensayo en la cual la velocidad relativa, el material de una de las partes, el caudal, la dureza y el tamaño de abrasivo, están determinadas por la norma, quedando como variables las propiedades de la probeta a evaluar y las cargas a aplicar en el ensayo.

En estos ensayos se generan ondas acústicas por varias causas: choque de las partículas con las superficies, abrasivo que se rompen en la zona de contacto, fisuras que se generan y propagan, crestas de las superficies que se sueldan y se arrancan, cortes generados entre las partes, etc. Todos estos fenómenos mencionados fueron registrados y analizados en este trabajo.

2. DESARROLLO EXPERIMENTAL

2.1 Metodología para la construcción de las probetas

Partiendo de una barra de acero SAE 1020 normalizado, se construyeron probetas con forma de prisma de 25 mm x 76 mm x 12,7 mm. Las mismas fueron recargadas con dos tipos de electrodos comerciales para soldadura muy utilizados en la industria, uno que genera un aporte de dureza intermedia y el otro uno de mayor dureza. La marca de los electrodos de aporte es Conarco y el material se aplica a través de soldadura por arco eléctrico. Entonces se realizaron tres configuraciones de probetas, a estudiar por abrasión, según las capas aportadas con los electrodos, las cuales están especificadas en la Tabla I. Para el primer caso (probetas tipo A) se aplicó una capa con electrodos Conarcrom 350 logrando un recubrimiento de dureza intermedia. En el segundo caso (probetas tipo B) se realizaron dos capas de aporte de distinta dureza con electrodos Conarcrom 350 y 600. El tercer caso (probetas tipo C) corresponde a un depósito con electrodos Conarcrom 600 de mayor dureza. Las composiciones químicas que caracterizan los distintos recargues están disponibles en la Tabla II.

Luego de ser aportadas, las probetas fueron mecanizadas con un rectificado tangencial asegurando una buena terminación superficial (Fig. 1) similar para los tres tipos de probetas, que sea repetible y de fácil obtención industrial, dejando constante una de las variables que intervienen en el sistema tribológico y en la EA según lo sugerido por la literatura (Baranov, 1997).

Tabla I: Recubrimientos de las probetas.

Probetas	Recubrimiento
A	Conarcrom 350
B	Conarcrom 350 + 600
C	Conarcrom 600



Fig. 1. Probeta rectificada.

Tabla II: Composición química de los electrodos.

Electrodo	Mn	C	Si	Cr	Clasificación
Conarcrom 350	0,65%	0,22%	0,51%	1,19%	DIN 8555;E6-55R
Conarcrom 600	0,54%	0,67%	1,02%	7,01%	DIN 8555;E1-351

2.2 Máquina de desgaste

La máquina de desgaste utilizada fue diseñada y construida en el laboratorio de E.A. de la UTN FRD mediante un PID UTN.

Esta máquina permite realizar ensayos con diferentes cargas, y bajo los lineamientos de la norma denominada “Standard Test Method for Measuring Abrasión Using the Dry Sand/Rubber Wheel Apparatus” ASTM G65, la cual consiste en generar abrasión sobre la probeta a través de arena que cae y actúa sobre la superficie del material de la probeta empujada por una rueda de goma, en un procedimiento estandarizado (ver Fig. 2).

La transmisión diseñada utiliza un moto-reductor marca SEW con un motor de 1500 rpm y 0,55 kW de potencia con una relación i: 1 a 15. En el eje de salida se instaló una transmisión a correa y polea para fijar la velocidad de giro de la rueda en 200 rpm según lo indica la norma ASTM G65 (ver Fig. 3).

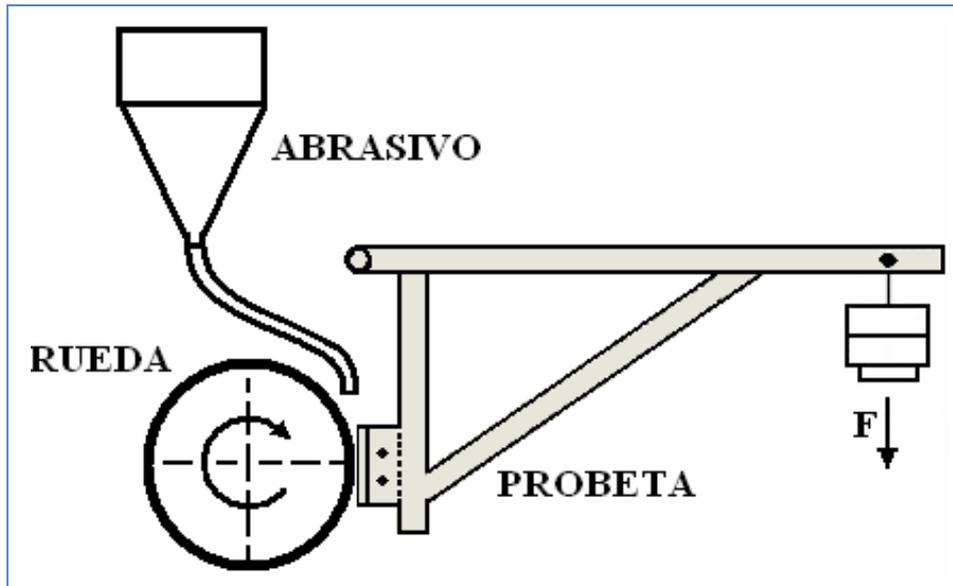


Fig. 2. Esquema de máquina de ensayo de abrasión ASTM G65.



Fig. 3. Trasmisión de máquina de abrasión.

2.3 Medición de la EA

Además, se la instrumentó con un sensor de EA que se acopla a través del porta-probetas con una sonda de onda para que la temperatura generada en la abrasión no afecte al sensor.

Para medir la EA se utilizó un equipo comercial de marca PAC modelo DISP-4 (ver Fig. 4) con un sensor de la misma marca modelo R15I resonante en 150 kHz con preamplificador integrado. Como acoplante entre el sensor y el soporte de la probeta se colocó grasa de resistente a alta temperatura, ya que el calor generado en la abrasión es muy alto. El sensor fue sujetado a través de un guía de ondas adherida al soporte de la probeta.



Fig. 4. Máquina G65 instrumentada con equipo de EA.

El abrasivo utilizado fue secado y tamizado de acuerdo a lo que indica la norma (ver Tabla III). El caudal debe estar entre 300 a 400 gr por minuto, esta variable, es garantizada por la sección de salida de la de la boquilla, para lo cual debe examinarse que no se encuentre tapada, o con cualquier defecto. Antes de comenzar la prueba se debe garantizar una cortina uniforme de arena con flujo laminar.

Tabla III: Granulometría del abrasivo.

Tamiz (tamaño)	Tamaño de la apertura de tamiz	% retenido en tamiz
40	425 μm (0,0165 in)	no
50	300 μm (0,0117 in)	5 % máx.
70	212 μm (0,0083 in)	95 % mín
100	150 μm (0,0059 in)	no

3. RESULTADOS

3.1 Medición de dureza

Para caracterizar los recubrimientos se realizaron cortes refrigerados de las probetas para evitar cambio de estructura metalográfica y luego se incluyeron las probetas en baquelita. Sobre esas muestras se realizó un perfil de micro dureza para evaluar la capa dura (ver Fig. 5). En estas curvas se puede apreciar que las capas endurecidas en los casos A y C son de aproximadamente de 1,2 mm y el caso B es de 2,5 mm. Esto se debe a la mayor cantidad de material aportado. Respecto a la dureza se puede ver que el recubrimiento A en la superficie está en los 262 HV. El recubrimiento C llega a un máximo en la superficie a 610 HV, mientras que el procedimiento B llega a los 850 HV. Esta dureza es generada por la formación de carburos que se produce al aplicar

el aporte. El aporte Conarcrom 600 tiene mayor cantidad de Cr y C los cuales forman carburos de alta dureza. Es por ello que la probeta C supera en dureza a la A.

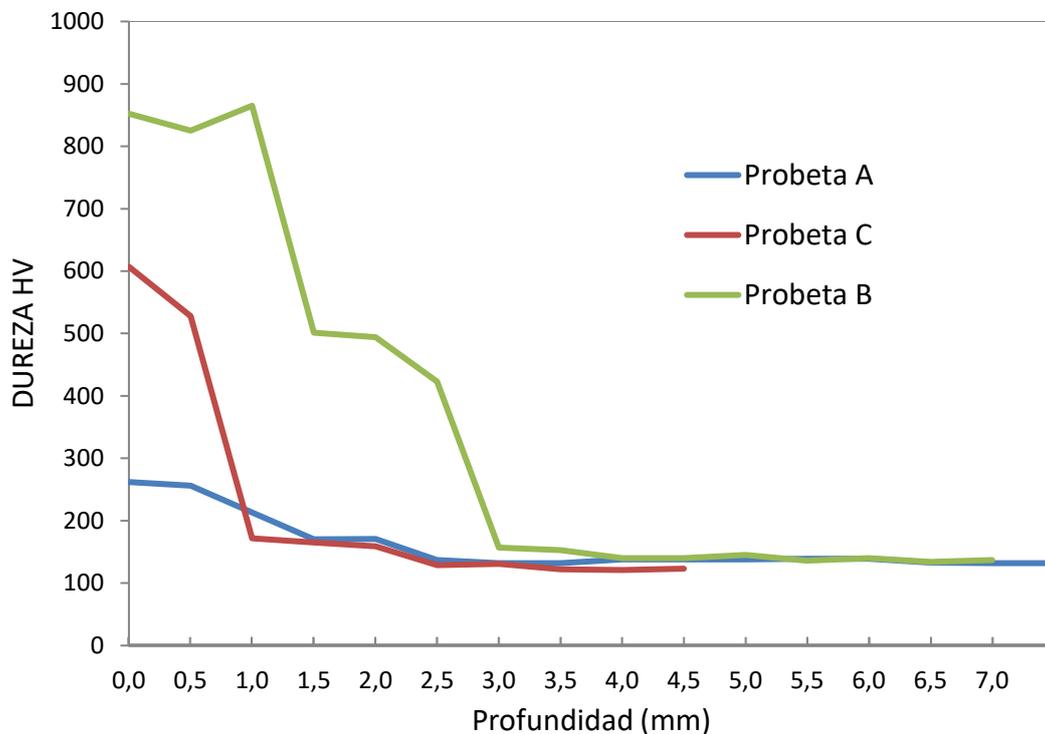


Fig. 5. Perfiles de dureza de los recubrimientos.

Pero como se aprecia en las curvas la dureza va cayendo a medida que nos alejamos de la superficie, debido a que estos carburos se van diluyendo en la matriz con pocos aleantes. Esta caída de dureza es muy abrupta en el caso de las probetas C mientras que en las B se forma un gradiente de dureza más suave dado que el aporte de alto contenido de aleación fue colocado sobre el Conarcrom 350 que tiene un contenido intermedio de Cr y C.

La mayor dureza final de las probetas B se debe al mayor espesor de recubrimiento donde la dilución de los carburos es menor.

3.2 Ensayo de desgaste

Previo a cada ensayo de desgaste se midió la masa de las probetas cuyo valor promedio salió de más de 5 mediciones. Lo mismo se repitió en las probetas ensayadas y así se calculó la variación de masa (ver Tabla IV). Los ensayos de desgaste realizados fueron de 10 minutos de duración cada uno.

Tabla IV: Variación de masa.

	Probetas A	Probetas B	Probetas C
Variación de masa	0,2123	0,1295	0,1842

3.3 Medición del perfil de la escara

Se realizaron mediciones del perfil a través de barridos con un sistema laser donde se relevó la topografía de las escaras. (ver Fig. 6). Se realizó un barrido rectangular abarcando una superficie

de aproximadamente 15 mm x 25 mm. El paso utilizado fue de 100 μm m en el eje X y de 180 μm en el eje Y.

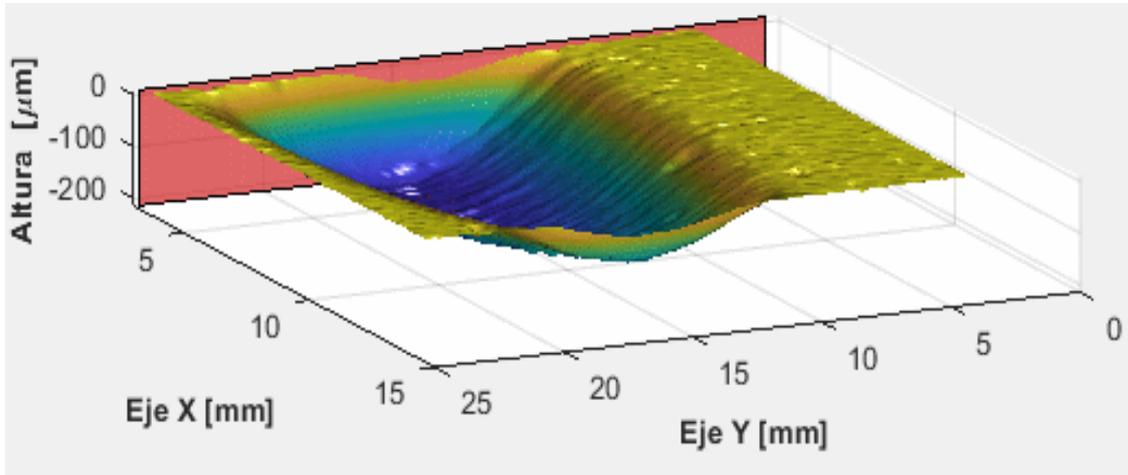


Fig. 6. Perfiles de escara de la probeta A cortados en planos paralelos al eje Y.

Con la técnica de medición de perfil se puede ver la alineación entre la rueda y la probeta (ver Fig. 7). Sobre la izquierda de la Fig. 7 se ve la escara de un ensayo donde la probeta no apoyo perfectamente perpendicular al radio de la rueda y sobre la derecha se aprecia un ensayo bien alineado. Esto permite evaluar que tan descentrados fue el ensayo y validarlos o no de acuerdo a la simetría del mismo.

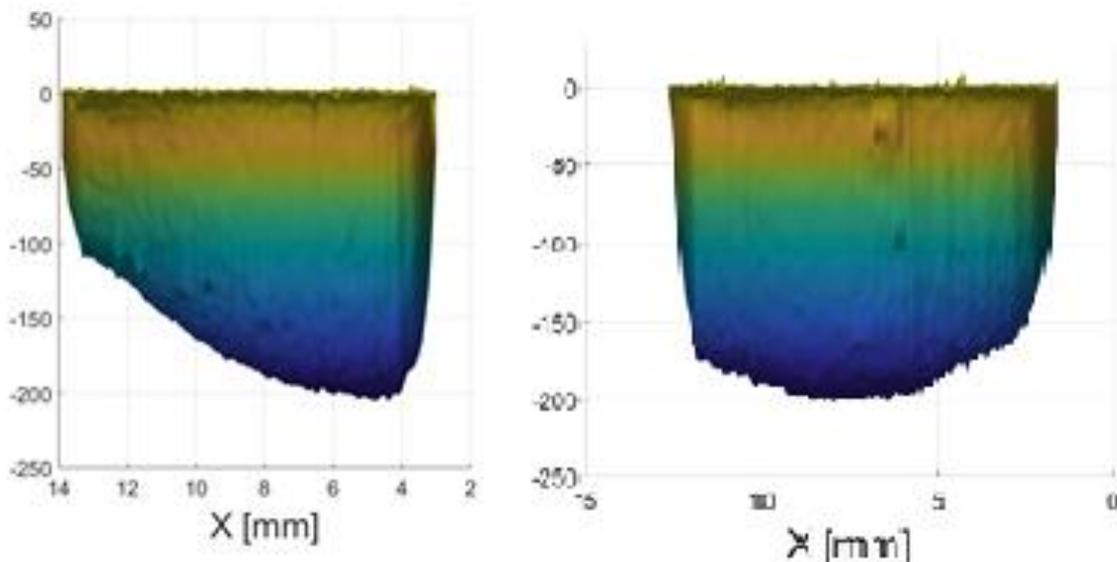


Fig. 7. Resultado de los perfiles transversales paralelos al eje X.

También se midieron ancho y largo de la huella obtenida como promedio de la medición de cada barrido. En el caso del ancho, tal como se esperaba no hubo gran variación porque depende del ancho de la rueda que siempre fue la misma, pero en el largo de la huella, si debido a los distintos volúmenes de desgaste.

Largo de las escaras

Largo de escara integrado Probeta A.....	18,54 mm.
Largo de escara integrado Probeta B.....	16,02 mm.
Largo de escara integrado Probeta C.....	16,92 mm.

Estos resultados se correlacionan con la medición de variación de masa.

3.4 Medición de EA

En las Figuras 8, 9 y 10 se ven los resultados de la medición del parámetro RMS, valor cuadrático medio de la EA, tomados en los ensayos de las Probetas tipo A, B y C respectivamente.

Se pudo observar en los ensayos de abrasión que los valores del parámetro RMS de la EA en las probetas del caso A (C350) mostraron un valor más bajo que los demás recubrimientos y su comportamiento se mantuvo bastante estable con el paso del tiempo.

En las probetas del caso C (C600/matriz) el valor inicial del valor RMS de la EA es más alto que en el caso A y además con el transcurso del tiempo comienza a bajar hasta estabilizarse.

En las probetas del caso B el valor de RMS de la EA inicialmente es similar a las del caso C y su decaimiento se hace más acentuado en el tiempo y a los 500 s se estabiliza.

Dado que el recubrimiento de C350 tiene menor contenido de C y Cr formando menor cantidad de carburos, esto lo hace menos duro y más tenaz.

Las probetas del caso del aporte con los electrodos C600 tienen mayor dureza por la presencia de carburos y hace que sea un recubrimiento más frágil. Es por ello que la EA inicial es mayor en este tipo de recubrimiento.

Los recubrimientos combinados C600/C350/matriz logran un gradiente de dureza desde la superficie hacia el bulk producido por la distinta cantidad de carburos. Se puede observar que al inicio el RMS es similar al del C600, pero luego se estabiliza más rápido.

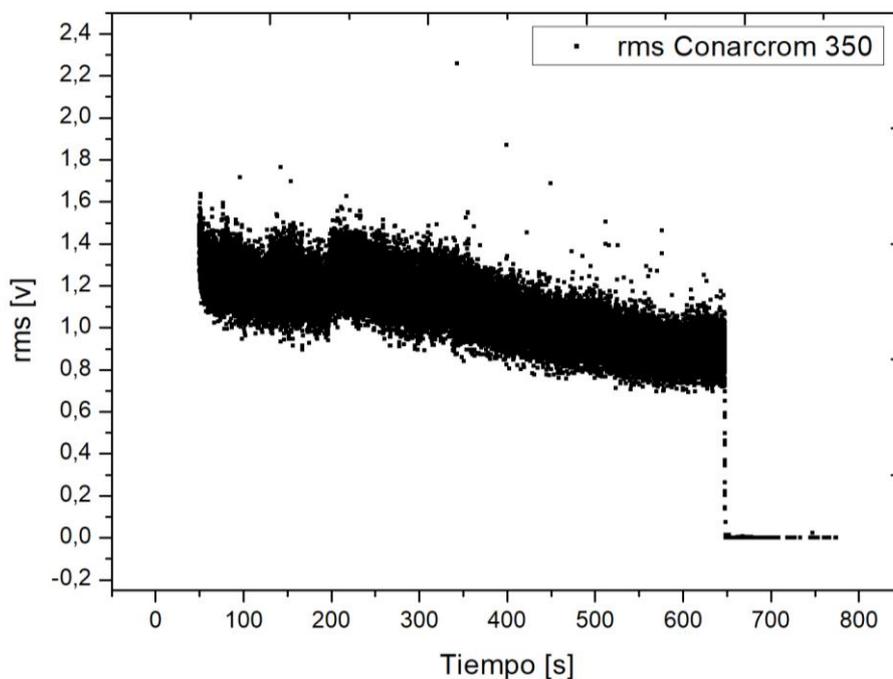


Fig. 8. Valor RMS de la EA en la Probeta A.

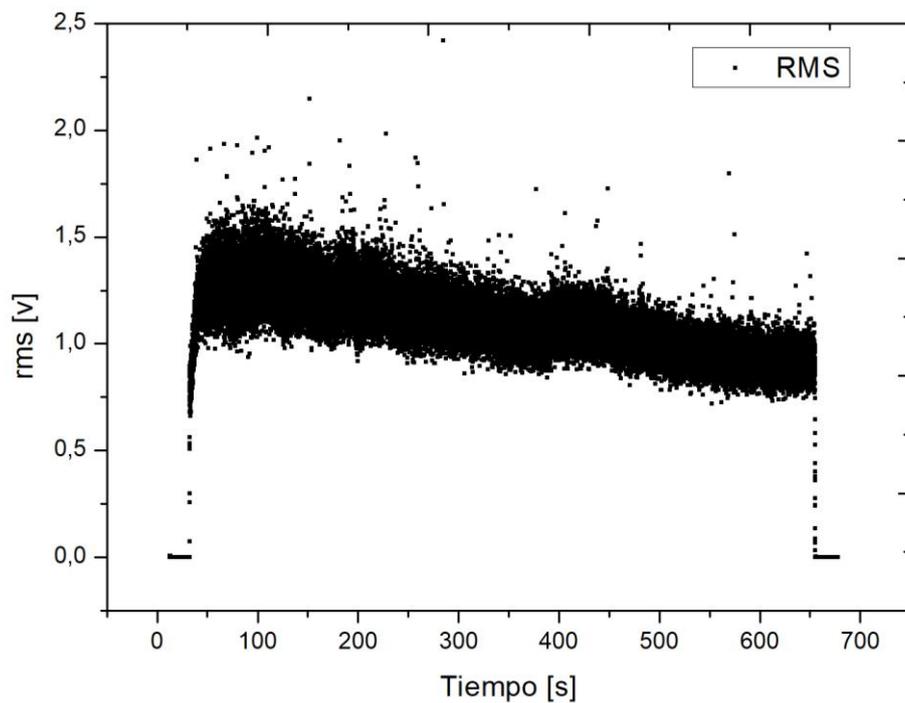


Fig. 9. Valor RMS de la EA en la Probeta B.

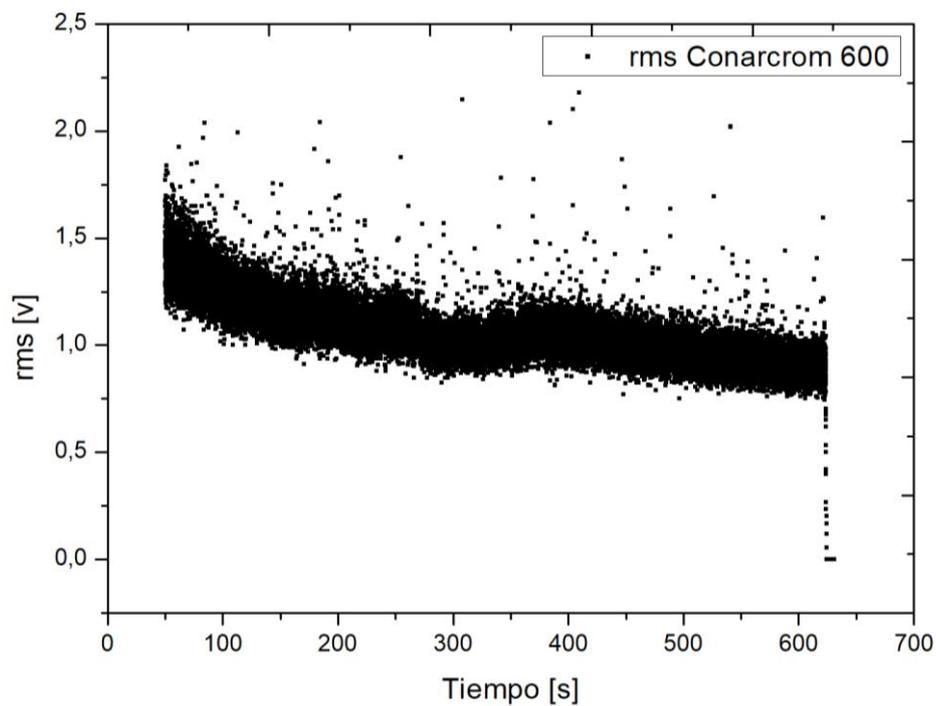


Fig. 10. Valor RMS de la EA en la Probeta C.

4. CONCLUSIONES

- Viendo los resultados de variación de masa es evidente que un recubrimiento combinado de los dos materiales de aporte genera una protección al desgaste por abrasión más adecuado. Dando como resultado una combinación de un recargue duro y frágil en la superficie y un

gradiente de dureza y tenacidad que va muy suave a medida que vamos hacia el bulk, permitiendo el mejor aprovechamiento de estos aportes.

- La medición de perfiles nos permitió desarrollar una técnica para validar ensayos y evaluar las distintas formas de la geometría de las escaras, generando una técnica alternativa a la medición de variación de masa.
- Los valores RMS de la señal de EA nos permitieron discriminar el comportamiento de dos materiales de distinta dureza y tenacidad. Esta diferencia relativa es sólo en la parte inicial del ensayo dado que en el bulk los materiales son similares. No se ha podido evidenciar diferencias en los demás parámetros de EA, sin embargo, habría que realizar más ensayos con distintas configuraciones de medición y seguir evaluando las señales generadas en la abrasión para poder caracterizar mejor el comportamiento tribológico.
- Con la implementación de la técnica de EA, a través del valor RMS podemos ver y monitorear on line el avance del desgaste y evaluar cuando el mismo llega a distintas capas del recubrimiento. Esto genera una gran oportunidad para evaluar componentes de máquinas, permitiendo conocer el estado de los mismos a tiempo real y en funcionamiento para evitar roturas catastróficas, y poder hacer un mantenimiento planificado y predictivo.

REFERENCIAS

1. V. Baranov, E. Kudryavtsev, G. Sarychev, V. Schavelin “Acoustic Emission in Friction”; Editor B.J. Briscoe, Elsevier (2007)
2. V.M. Baranov, E.M. Kudryavtsev, G.A. Sarychev, “Modelling of the parameters of emission under sliding friction of solids”; Wear, Vol. 202 (1997), p. 125-133.
3. P. Pérez-Oviedo, J. Torres-Nieto, “Guía para calcular el desgaste abrasivo entre componentes no lubricados”, ISSN2448-623X.
4. “Standard Test Method for Measuring Abrasion Using the Dry Sand/Rubber Wheel Apparatus.” ASTM G65

ANÁLISIS, TRANSFORMACIÓN Y RESÍNTESIS DE SONIDO: UNA IMPLEMENTACIÓN DE LA TÉCNICA ATS COMO BASE PARA POSIBLES INTERRELACIONES ENTRE SEÑALES SONORAS Y SEÑALES DE AUDIO DIGITAL

Perna G. L.^a, Paupy P.^b y Huggenberger D.^b

^aLaboratorio de vibraciones mecánicas-Grupo de investigación acústica, FRD, Universidad Nacional Tecnológica, ARGENTINA

^bLaboratorio de vibraciones mecánicas-Grupo de investigación acústica, FRD, Universidad Nacional Tecnológica, ARGENTINA

^cLaboratorio de vibraciones mecánicas-Grupo de investigación acústica, FRD, Universidad Nacional Tecnológica, ARGENTINA

e-mail: guillermoluisperna@gmail.com

e-mail: pablo.paupy@gmail.com

e-mail: dahugen@yahoo.com.ar

RESUMEN

Dentro del conjunto de técnicas de análisis espectral y síntesis de señales sonoras disponibles, la técnica ATS (Analysis-Transformation-Synthesis) brinda importantes posibilidades dentro del paradigma del análisis espectral y resíntesis de sonido. Como la mayoría de las técnicas de análisis espectral, ATS está basado en el Teorema de Fourier y su aplicación en la Transformada Discreta de Fourier (DFT) pero, a diferencia de otros, evalúa información psicoacústica y separa la información de la señal de audio en dos partes: una determinística y otra estocástica o residual. Esta representación tiene ventajas, ya que distingue dos aspectos de una señal, más allá de que estos se presenten en distintas proporciones dentro de un sonido en particular. Estos dos aspectos son cualitativamente distintos ya que un sonido de espectro armónico o uno inarmónico (parte determinística) formado por trayectorias sinusoidales, se escucha, se evalúa y se resintetiza de distinta manera que otro que está pensado como energía de bandas de ruido (parte no determinística o residual). El objetivo principal del trabajo es presentar la primera implementación de la técnica ATS en una aplicación informática e de características novedosas ya que, hasta el momento, no existía un programa autosuficiente programado en lenguaje C, ejecutable por línea de comando, para la manipulación de dicha técnica como lo es ATS-C. A su vez, se presentarán posibles aplicaciones surgidas de la interrelación entre análisis de vibraciones en instrumentos musicales y la técnica ATS. Este cruce de campos abre una línea de investigación innovadora sobre posibles vinculaciones e interacciones recíprocas entre mediciones de señales de vibraciones mecánicas tomadas en distintas fuentes sonoras acústicas –intervenidas para la transformación del sonido emitido o no intervenidas para la conservación de su sonido característico- y el audio digital. Los resultados obtenidos fueron satisfactorios y serán presentados en ejemplos de audio, espectrogramas o gráficos.

Palabras Clave: Vibraciones mecánicas, Resíntesis de sonido, Análisis espectral, Técnica ATS

INTRODUCCIÓN

La técnica ATS y sus distintas etapas de desarrollo

La técnica ATS, como la mayoría de las técnicas de análisis espectral, está basada en el Teorema de Fourier y su aplicación en la Transformada Discreta de Fourier (DFT) pero, a diferencia de otros, evalúa información psicoacústica y separa la información de la señal de audio en dos partes: una determinística y otra estocástica o residual. Esta representación tiene ventajas, ya que diferencia dos aspectos de una señal, más allá de que estos se presenten en distintas proporciones dentro de un sonido en particular. Estos dos aspectos son cualitativamente distintos ya que un sonido de espectro armónico o uno inarmónico (parte determinística) formado por trayectorias sinusoidales, se escucha, se evalúa y se resintetiza de distinta manera que otro que está pensado como energía de bandas de ruido (parte no determinística o residual).

Es necesario mencionar brevemente los antecedentes del trabajo sobre la técnica ATS en diferentes instancias de su historia. Podemos mencionar entonces a *Parshl* como una experiencia antecesora desarrollada en 1985 por J. O. Smith III (Smith, J. O. 1985) (*Center for Computer Research in Music and Acoustics-STANFORD*) utilizada para analizar y emular mediante síntesis aditiva sonidos de piano. *Parshl* utiliza e introduce la técnica de detección de picos (*Peak detection*) de frecuencia. Esta técnica se basa en la idea de que si el espectro de un sonido analizado está lo suficientemente muestreado, se puede lograr discriminar un pico de frecuencia que esté entre otros dos picos, determinados por los datos que brinda el análisis. Luego, en base a estos valores, interpola dichos picos de frecuencia en el tiempo. Este procedimiento es conocido como *peak tracking*. De este modo, la información espectral que proviene del análisis de Fourier, se puede representar a través de una serie de trayectorias sinusoidales para cada parcial del espectro, agregando valores precisos de frecuencia, fase y amplitud. Continuando en la línea que marcó Parshl, Xavier Serra (Serra, X. 1990) trabajó en el desarrollo de una técnica conocida como SMS (*Spectral Modelling Synthesis*) e introdujo un nuevo concepto en el paradigma del análisis espectral de una señal digital, al dividir a ésta en dos aspectos: el aspecto determinístico (información obtenida a partir de la técnica de *Peak Tracking* descripta antes) y el aspecto estocástico o residual. Xavier Serra expuso que la parte determinística, se puede restar de la señal original,

quedando así otra señal a la que llamó *parte residual* (no determinística). Serra representa a la parte estocástica con una aproximación de su envolvente espectral cambiante en el tiempo. De esta forma, se llega finalmente a la técnica ATS, que es central en este trabajo, y que constituye un paso más en esta línea. Su creador, Juan Pampin (Pampin, J 2004), parte de los desarrollos de J. O. Smith y Serra ya explicados e introduce información psicoacústica en el análisis. La parte residual se representa aquí con valores de energía de ruido en diferentes bandas, en base a las bandas críticas propias de nuestro sistema auditivo. Originalmente el usuario puede poner en juego la *tasa de enmascaramiento* (es decir, el grado en que un parcial de un sonido está “cubierto” o “enmascarado” por otros de mayor amplitud que estén cercanos en tiempo y frecuencia). En dicha etapa se pueden realizar diversas evaluaciones y así suprimir o darle más importancia a determinadas trayectorias sinusoidales en el análisis, la transformación o la resíntesis.

Entre los años 2000 y 2003, en nuestro país, se llevó a cabo un proyecto interuniversitario de investigación dirigido por Juan Pampin y Pablo Di Liscia (Di Liscia 2003) pertenecientes a la Universidad de Washington (Seattle) y la Universidad de Quilmes respectivamente. Este equipo creó ATSH, una aplicación informática con interfaz gráfica basada en GTK, que comenzó siendo un tipo de editor de archivos ATS capaz de realizar análisis, resíntesis de archivos de audio y moderadas transformaciones espectrales en dicho proceso. Con el desarrollo del aplicación informática ATSH se incluyeron funciones para que el usuario pudiera modificar el espectro: suprimir componentes, desviar frecuencias, etc. También, en el marco de dicho proyecto, se desarrolló una biblioteca en lenguaje C con un programa autosuficiente (*ATSA*) para el análisis ATS, y Unidades de Procesamiento que trabajan con la técnica ATS para los entornos *Open Source* de programación de sonidos Csound, *SuperCollider* y *Pure Data*. En este contexto se presenta la aplicación informática ATS-C (2019) como un desarrollo propio que implementa la técnica ATS con definidas particularidades como se desarrollará a continuación.

1. DESARROLLO Y ESTRATEGIAS PARA LA PRODUCCIÓN DE ATS-C

La técnica ATS-C utiliza para la resíntesis de la parte determinística, una técnica basada en el uso de síntesis aditiva y para la parte no determinística un uso especial de generadores de ruido.

ATS-C es un programa en lenguaje C que utiliza funciones de la biblioteca *Sndlib*¹ y se ejecuta por línea de comando. *ATS-C* para su funcionamiento hace uso de programas previamente realizados que, según el caso, se implementan tanto para la realización de la parte de análisis y obtención de datos como para la parte de resíntesis. Dichos programas son: *ATSMORPH* y *OSCIL-ADI*².

ATS-C realiza resíntesis de sonido a partir de datos provenientes de un determinado archivo de extensión tipo *.ats* y devuelve un archivo de audio de extensión *.wav*. El archivo de salida tendrá dos canales, en uno se encuentra la resíntesis de la parte determinística y en otro la resíntesis de la parte residual. La resíntesis, en ambos casos, se realiza en base a los datos obtenidos del archivo *.ats* proveniente del análisis. *ATS-C* cuenta con la posibilidad de transformar los datos mencionados que provienen del análisis, para luego resintetizar en base a esos datos modificados. De esta manera, en caso de que se opte por algún procedimiento de transformación, el resultado sonoro que obtendremos a partir del archivo de salida no será completamente coincidente con los datos obtenidos del archivo *.ats* de entrada, ya que en el medio de la cadena estos datos se verán modificados.

Tanto para la programación de los procesos de resíntesis como para las transformaciones se tuvieron en cuenta metodologías de resíntesis de sonido previamente trabajada en el laboratorio de acústica UTN-FRD en donde se interrelacionaron señales de vibración mecánica con señales de audio digital obtenidas por procesamiento de las mismas mediante síntesis aditiva (Paupy, P. 2017) (Perna, G. 2017). Estas experiencias previas determinaron la importancia de incluir componentes de ruido, en las señales resintetizadas centradas en bandas de frecuencias determinadas junto con diversas pruebas de análisis-resíntesis (Di Liscia P. 2004) que se realizaron para obtener resultados bajo distintos métodos y poder comparar la calidad perceptual en cada proceso de resíntesis.

¹ Realizada por Bill Schosttaedt, CCRMA, Stanford University.
<https://ccrma.stanford.edu/software/snd/sndlib/>

² Realizados por Oscar Pablo Di Liscia.

Los archivos de análisis ATS provienen de registros sonoros (grabaciones) realizados en ambientes silentes y sin reverberación para lograr una adecuada resíntesis. Asimismo, se trabajó con fuentes sonoras diversas para comprobar la versatilidad de los métodos.

En los siguientes apartados se detallarán algunas estrategias metodológicas a las que se recurrió en la programación para la generación de resíntesis tanto de la parte determinística como para la parte residual dentro de ATS-C.

1.1 Resíntesis de la parte determinística e interpolación

La parte determinística se resintetiza utilizando un banco de osciladores alimentados con valores que provienen del análisis del archivo de entrada que se realiza con el programa original ATSMORPH.c. La resíntesis determinística se realiza, en ATS-C con valores de amplitud y frecuencia, sin información de fase. El programa interpola amplitud y frecuencia dentro de cada *frame* utilizando los valores de amplitud y frecuencia al inicio de cada *frame*, para calcular la amplitud y frecuencia instantánea en cada sample. La fase se inicializa en 0 al comienzo (*frame* inicial, sample inicial) y luego se calcula continuamente a través de la siguiente fórmula:

$$\theta(t) = \int_0^t \omega(\tau) \cdot d\tau$$

Se utilizó la función *integral()* para implementar la expresión anterior.

De esta manera se obtiene el incremento de fase en el tiempo, partiendo de un valor de fase inicial 0, por lo cual no hay interpolación de fase entre *frame* y *frame*, sino que se calcula en forma continua como incremento (Li, T. 2004) .

1.2 Resíntesis de la parte residual e interpolación

La parte residual se resintetiza utilizando un banco de osciladores y un generador de números *random* entre 0 y 1 utilizando la función *rand* del lenguaje C.

La síntesis de la parte residual se efectúa determinando una fase aleatoria inicial para cada parcial para cada *frame*. Los datos de amplitud residual son aportados por el algoritmo de análisis ATSMORPH y la frecuencia residual, en cada parcial, es la misma que la determinística. La amplitud instantánea se interpola de igual manera que en la

determinística, pero la frecuencia se ajusta a través del *frame*, de modo tal que la fase final del *frame corriente* iguale a la inicial (aleatoria) del *frame siguiente*, ya que los valores de fase al inicio de cada *frame* son determinados en forma aleatoria. Con esta técnica, el periodo de cada parcial puede sufrir un *alargamiento* o *acortamiento* en su trayectoria, dependiendo del valor final de fase por *frame*. De esta manera se altera levemente la frecuencia de cada parcial a niveles imperceptibles. Esta alteración se genera por el ajuste que se produce para alcanzar a la fase inicial del *frame siguiente*, que coincide con la fase final del *frame corriente*.

El procedimiento para lograr esta alteración se basa en la siguiente estrategia:

$\Delta\phi > 0,5$ se contrae el período

$\Delta\phi \leq 0,5$ se alarga el período

Si $\Delta\phi$ es mayor a π (o sea 0,5 normalizado) se emplea como desfase total $2\pi - \Delta\phi$, o sea $1 - \Delta\phi$. Así el período a través del *frame* en lugar de estirarse para alcanzar el valor final de fase, se contrae en un grado menor al que se estiraría. Igualmente, si $\Delta\phi$ menor a $-\pi$, se utiliza $2\pi + \Delta\phi$, o sea $1 + \Delta\phi$ para el caso contrario. Se logran así los menores incrementos o decrementos de ganancia del parcial para hacer coincidir la fase.

1.3 Transformaciones

La aplicación informática ATS-C permite hacer transformaciones al audio que podría obtenerse de una fiel resíntesis proveniente de los datos del archivo .ats. Estas transformaciones actúan sobre estos datos que provienen del análisis del archivo .ats y luego se entregan los datos *transformados* para la resíntesis.

Las transformaciones actúan tanto en la parte determinística como en la parte residual, según la necesidad del usuario, en forma independiente. El usuario puede realizar transformaciones en una sola de estas partes, para ello solo debe ingresar los datos de la parte a transformar y no ingresar datos para la que desea resintetizarse sin modificaciones³.

Las transformaciones disponibles son las siguientes:

- Supresión de frecuencias por bandas en Hz.

³ Cabe observar que la aplicación informática ATS-C en cada ejecución resintetiza las dos partes, la parte sin modificaciones se escuchara de todas formas por un canal mientras que por el otro se escuchara la parte que se optó por transformarla.

- Supresión de parciales contiguos.
- Envolventes de amplitud.
- Escalamiento de parciales en amplitud.
- Normalización de parciales.
- Modificación variable de frecuencia.
- Escalamiento en frecuencia de parciales.
- Supresión de parciales.
- Envolventes de amplitud.
- Escalamiento de parciales en amplitud.
- Normalización de parciales.

2. RESULTADOS

Los siguientes espectrogramas son una representación visual de los sonidos digitales obtenidos por medio de resíntesis en donde se aplicaron diversas transformaciones a través con la aplicación informática ATS-C⁴. Cada gráfico es encabezado con sus respectivas líneas de comando adonde se pueden observar el uso de *flags* para la introducción de los argumentos correspondientes para cada caso.

Envolvente de amplitud para parciales en la parte determinística

`./ATS-C violin-B5.ats out.wav -penvm 2 -penvM 5 -macrodet 1009`

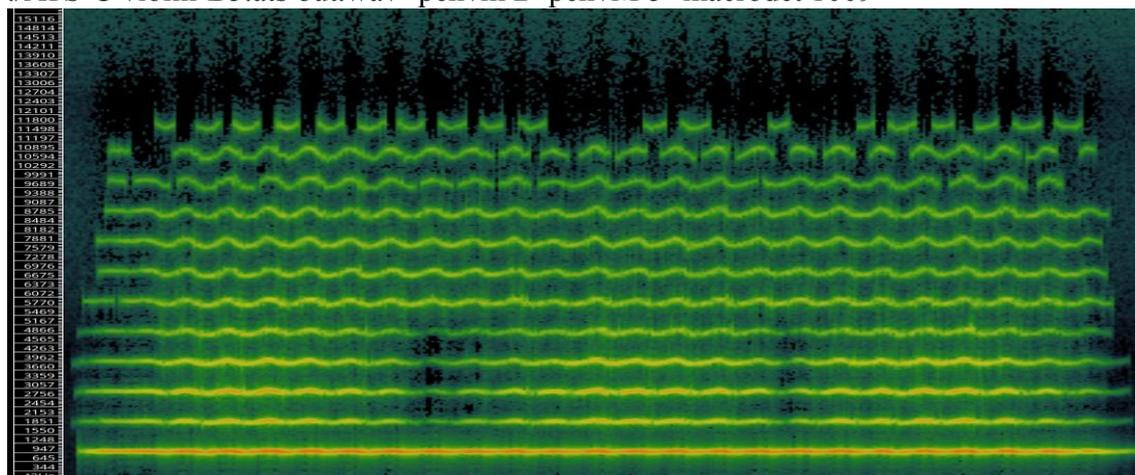


Fig. 1 Espectrograma del sonido resintetizado de un violín -Fuente:elaboración propia-

⁴ La aplicación informática ATS-C junto con diversos ejemplos de resíntesis digital de sonido de instrumentos musicales pueden encontrarse en: https://drive.google.com/open?id=1ix_dmfcOEPU-fRiBaU5iehZgLJdP4Xz2

Se puede observar en la Fig. 1 el espectrograma del sonido resintetizado digitalmente con una transformación en amplitud en las componentes n 2, 3, 4 y 5 con una envolvente de seis segmentos. Cabe notar que la envolvente sólo afecta a la parte del espectro seleccionada por los argumentos que se encuentran en la línea de comando `-penvM` y `-penvm` a través de los cuales se fijan el número de componente mínimo y máximo a afectar.

Normalización de parciales en la parte residual

`/ATS-C flute-A5.ats out.wav -nrm 3 -nrM 5 -fnr 0.8`

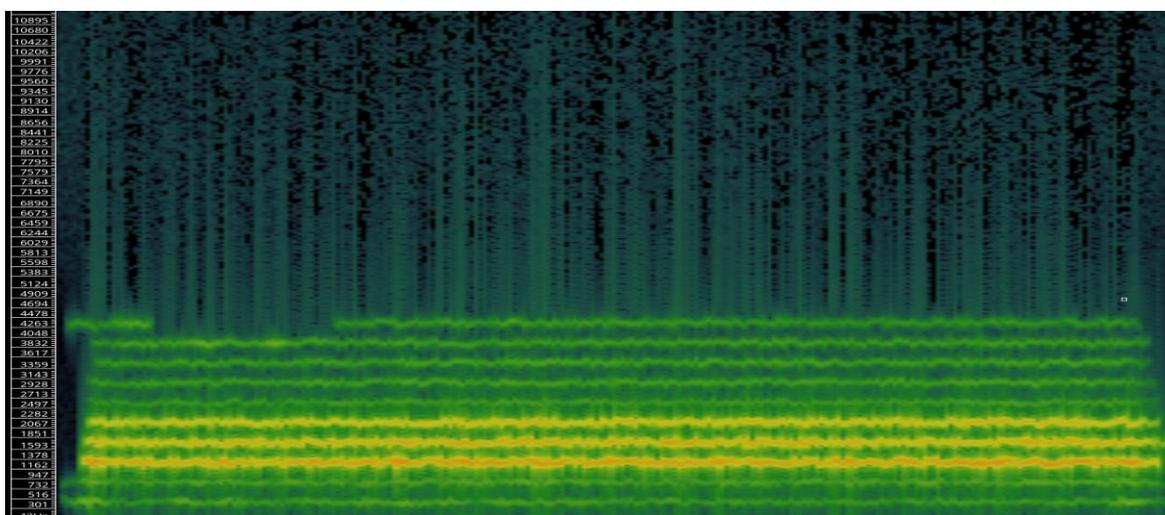


Fig. 2 Espectrograma del sonido resintetizado de una flauta -Fuente:elaboración propia-

En forma análoga al ejemplo de la Fig. 1, se puede ver en la Fig. 2 que la transformación, que en este caso es una normalización de componentes que se efectúa sobre la parte residual del espectro, afecta a las componentes n 3, 4 y 5.

Modificación variable de frecuencia en la parte determinística y residual

A continuación se puede ver en la Fig. 3 y Fig. 4 transformaciones producidas en el espectro, tanto para la parte determinística como para la parte residual, en donde la frecuencia varía a lo largo del tiempo en la resíntesis. En este caso no hay selección de componentes a afectar si no que la transformación afecta a todo el espectro por igual. A través de `-sbp` se ingresa en valor de porcentaje, teniendo en cuenta que el total del

archivo está representado por 100%, adonde se van a producir los *breakpoints* donde variará la frecuencia. A partir de cada *breakpoint* se modificará la frecuencia según el factor indicado por los valores ingresados en *-sft*.

```
./ATS-C female-speech.ats out.wav -sbp 13 26 37 58 81 85 95 -stf 1.0 0.9 0.8 0.7 1.1
1.5 2.0 2.7
```

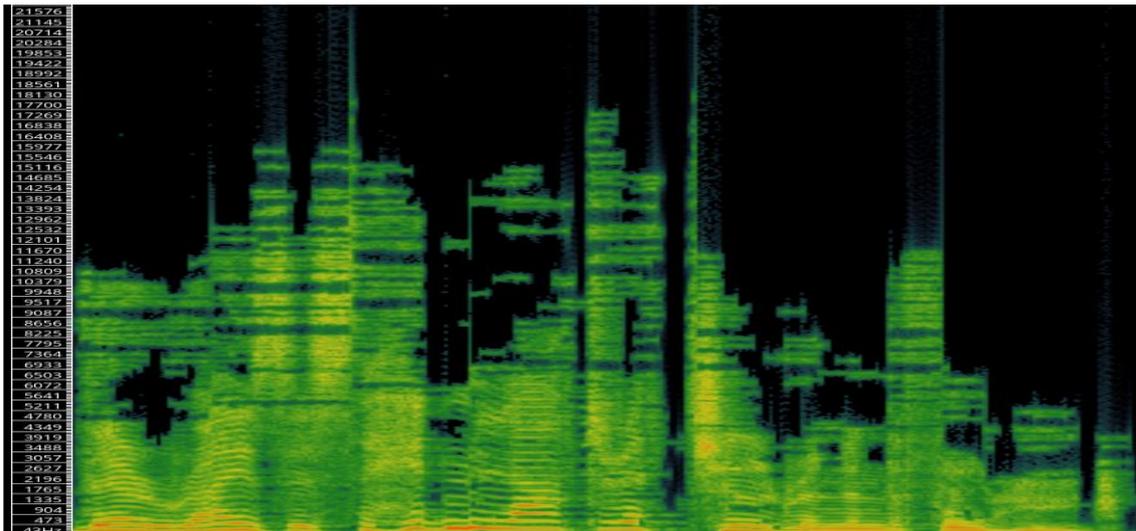


Fig. 3 Espectrograma del sonido resintetizado de una voz femenina -Fuente:elaboración propia-

Modificación variable de frecuencia en la parte residual

```
./ATS-C female-speech.ats out.wav -sbp 13 26 37 58 81 85 95 -stf 1.0 0.9 0.8 0.7 1.1
1.5 2.0 2.7
```

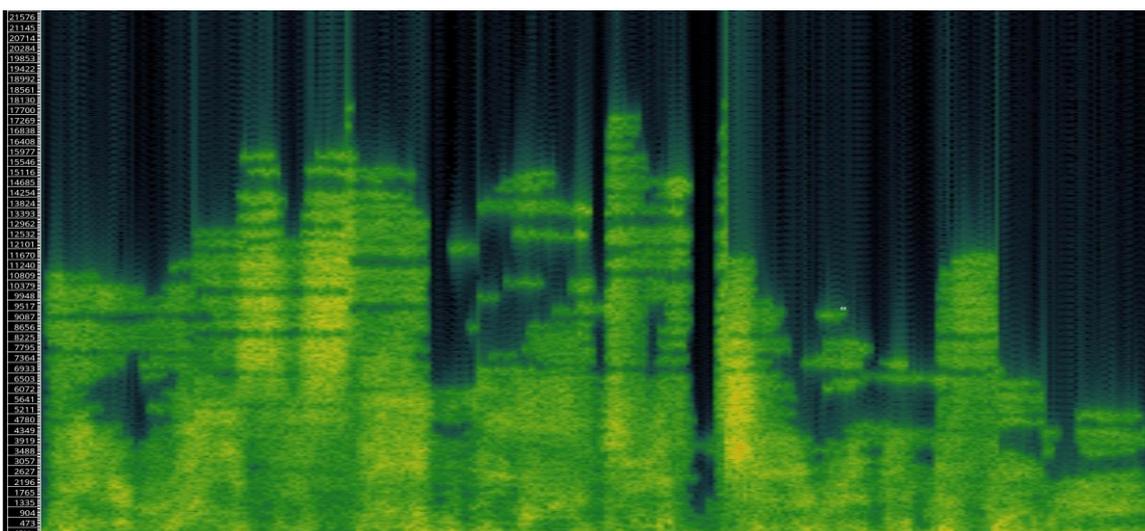


Fig. 4 Espectrograma del sonido resintetizado de una voz femenina -Fuente:elaboración propia-

2.1 Actualidad del grupo de investigación en acústica UTN-FRD y posibilidades de desarrollo a futuro en el trabajo sobre resíntesis digital de sonido.

Los resultados de resíntesis y transformación de sonido realizados sobre los datos obtenidos a partir de archivos digitales ATS, dejan una base sólida y un camino abierto para profundizar en la interrelación que puede existir entre las señales de vibraciones mecánicas medidas sobre un instrumento musical, señales sonoras y procesamientos de señales de audio digital. Hasta el momento, el equipo de investigación de acústica UTN-FRD, como se mencionó en el punto 1, realizó con éxito trabajos de resíntesis digital de sonido a partir de señales de vibraciones mecánicas tomadas en cuencos tibetanos con acelerómetros (Paupy, 2017). Sin tener en cuenta todavía los aspectos principales que tiene la técnica ATS, que es la de separar el espectro sonoro en dos partes: una determinística y otra residual. Dichos aspectos, como se pudo comprobar con los resultados obtenidos en la presente investigación, resultan perceptivamente más fieles -respecto al sonido original- al incluir en la resíntesis componentes de ruido que se encuentran presentes en las señales emitidas por las fuentes sonoras originales trabajadas. Se espera a futuro poder interrelacionar los campos mencionados avanzando sobre mediciones en instrumentos musicales de cuerdas frotadas. Para ello, actualmente se está indagando en el sistema de transmisión de sonido entre el complejo cuerda-caja en un *violoncello*. El objetivo principal es determinar la función transferencia del puente del instrumento, haciendo hincapié en el estudio detallado de su trascendencia, como adaptador de impedancias, entre el elemento vibrante y el cuerpo resonante. El proceso se encuentra en una etapa exploratoria, donde se busca determinar la constante elástica de los apoyos del puente sobre la caja de resonancia, para poder simular luego, sendos resortes que den una respuesta que simule la acción de la tapa real del instrumento. La determinación de esta constante presenta complicaciones debido a los altos valores del *módulo de Young* -del orden de los *Giga Pascals*-. Adicionalmente, se debe agregar que estas pruebas tienen en cuenta la diferencia de coeficiente de elasticidad de la tapa en cada apoyo del puente, debido a la asimetría constructiva del instrumento en su interior. Asimismo, se debe recordar que la madera del instrumento es material fuertemente anisotrópico, lo cual aporta mayores desafíos y dificultades en el proceso de medición y de estudio en

general. Se estima que todo el proceso de medición a realizar, aportará datos de señales de vibraciones mecánicas provenientes de los apoyos y de distintos puntos de la cabeza del puente. Estas mediciones serán en su mayoría tomadas por medio de sensores de aceleración y, a partir de los datos obtenidos, se espera aplicar e incluir las técnicas desarrolladas en ATS-C. Se destaca que aún no se han incluido componentes de ruido – como es propio de la técnica ATS- en ninguna de las pruebas de resíntesis realizadas hasta el momento sobre la base de datos proveniente de acelerómetros, es decir, de señales de vibración mecánica. Actualmente, se está trabajando en ese sentido, para poder vincular las áreas de investigación mencionadas: señales acústicas, señales de vibraciones mecánicas y procesamiento de señales de audio digital, con énfasis en el trabajo sobre instrumentos musicales como fuentes sonoras a investigar.

3. CONCLUSIONES

La aplicación informática ATS-C es una implementación en lenguaje C de la técnica ATS. Dicha técnica había sido implementada anteriormente en un desarrollo con interfaz gráfica como lo es ATSH o a través de desarrollos específicos para entornos *Open Source* de programación de sonidos y procesamiento de señales tales como *C-Sound* o *Pure Data*. Sin embargo, aún no se contaba con la posibilidad de que un usuario pudiera hacer uso de esta técnica a través del ingreso argumentos por línea de comando para realizar Análisis, Transformaciones y Síntesis de sonido en base a ATS, a través de un programa realizado en lenguaje C. Desde esta perspectiva se puede afirmar que ATS-C representa un aporte práctico y útil, ya que se pueden realizar con su uso múltiples procesamientos en paralelo y/o en serie con los sistemas de trabajo por lotes y de conexiones (pipes) de los sistemas operativos.

Las transformaciones disponibles actualmente en ATS-C son numerosas y determinan una base sobre la cual se pueden seguir sumando otras en etapas posteriores. Actualmente en ATS-C se desarrollaron mayor número de posibilidades de transformaciones que modifican al espectro en amplitud. En contraposición, son significativamente más escasas para el caso de las que transforman al espectro en frecuencia. En referencia a estas últimas, se puede continuar trabajando, en una primera instancia, para separar las transformaciones de la parte residual o de la parte determinística de modo que el usuario pueda optar por una u otra junto al agregado de

otras transformaciones aún no disponibles como envolventes de frecuencia. Por otro lado, se puede profundizar esta línea de investigación desde diversos abordajes en las distintas etapas ATS a) exploración de técnicas de análisis que complementen la implementación de la DFT actual, b) experimentación en resíntesis con fase inicial distinta a cero c) transformaciones tales como la implementación de síntesis granular de componentes específicas del espectro de un sonido tanto para la parte residual como para la determinística d) Aumentar la cantidad de transformaciones a partir de las existentes. e) Experimentar con resíntesis en base a distintos tipos de síntesis diferentes a la aditiva.

REFERENCIAS

- Di Liscia O.P., Pampin, J., Spectral analysis based synthesis and transformation of digital sound: the ATSH program. Proceedings IX Brazilian Symposium on Computer Music, Campinas, 2003.
- Di Liscia O. P., *Generación y procesamiento de sonido y música a través del programa Csound*. Buenos Aires, UNQ Editorial; 2004.
- Di Liscia, O. P., A Pure Data toolkit for real-time synthesis of ATS spectral data. Linux Audio Conference 2013, IEM, Graz, 2013; 105-110.
- Li, Tao & Pan, Zhigeng & Zhang, Mingmin & Ye, Kai., Watermarking subdivision surfaces based on addition property of Fourier transform; 2004.
- Pampin, J., *ATS: A System for Sound Analysis, Transformation, and Synthesis Based on a Sinusoidal Plus Critical Band Noise Model*. Proceedings of the 2004 International Computer Music Conference, 2004.
- Paupy, Pablo; Perna Guillermo; Huggenberger, Darío. Síntesis Digital de sonido realizada sobre la base de señales de vibraciones mecánicas de una cavidad resonante. En EGLEA 9, CNEA, Oberá; 2017.
- Perna G., Paupy, P., Huggenberger, D., Análisis espectral y resíntesis de sonido: Técnica ATS-Modelo análisis-resíntesis a partir de señales mecánicas. En CicTeM; 2017.
- Perna, Guillermo; Paupy, Pablo; Huggenberger, Darío. Análisis espectral y resíntesis de sonido: técnica ATS y modelo de Análisis- Resíntesis a partir de señales mecánicas. En Revueltas del Arte II, UNA. Buenos Aires; 2017.
- Serra, X- Smith J.O. III, A sound Analysis/Synthesis System Based on a deterministic plus Stochastic Decomposition. Computer Music journal, MIT Press, 1990.
- Smith J.O., Serra, X., PARSHL: An analysis/synthesis Program for Non-Harmonic sound based on a Sinusoidal representation, Center for Computer Research in music and Acoustics, Stanford 1985.

ESTUDIO DE LA NORMA DE ENSAYO DE EMISIÓN ACÚSTICA PARA LA DETECCIÓN DE CORROSIÓN EN TANQUES LLENOS DE LÍQUIDO EN ARGENTINA

Semorile, M. ^a, Montenegro, A. N. ^b, Tellería, G. ^c

^aGerencia de Mecánica y Metalurgia, IRAM Instituto Argentino de Normalización y Certificación, ARGENTINA

^bGrupo OAT, Departamento de Mecánica Aplicada, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional del Comahue, ARGENTINA

^cGTI Inspecciones, ARGENTINA

e-mail: msemorile@iram.org.ar

RESUMEN

Por medio de la Resolución 785/2005 de la Secretaría de Energía, la inspección de tanques aéreos ha sido reglamentada con la finalidad de controlar las pérdidas de hidrocarburos y sus derivados almacenados.

En el año 2017, a partir de la iniciativa del grupo de inspección de la Universidad Nacional del Comahue, la comisión de Emisión Acústica del IRAM comenzó a desarrollar la norma IRAM 725 para establecer los principios generales del ensayo por emisión acústica para la detección de corrosión activa en recipientes metálicos llenos de líquido.

En esta norma, se establece un sistema de clasificación que proporciona una escala en función de la velocidad de degradación del componente sometido a ensayo, debido a la corrosión. Finalmente, se evalúan los datos obtenidos y en función de la actividad de las fuentes halladas, se determina su apertura inmediata o el periodo máximo recomendado hasta la próxima inspección.

Palabras Clave: EA en tanques, detección de corrosión, IRAM 725, Res, 785/05.

1. INTRODUCCIÓN

La inspección de un tanque y en especial de su fondo, resulta generalmente compleja cuando está en servicio, ya que es inaccesible y la única indicación de deterioro se puede observar desde su exterior, especialmente cuando existen fugas. Este método visual, sin embargo, no asegura que la fuga no exista y que la misma vaya directamente al suelo.

Por tal motivo, la mayoría de los métodos tradicionales de inspección en fondos de tanques implican su salida de servicio, su limpieza, su descontaminación y traslado de residuos y la aplicación de ensayos localizados para verificar la condición de integridad.

Previo a la asignación de recursos de mantenimiento es fundamental contar con la información adecuada, ya que la actividad de inspección involucra diversos costos, que eventualmente podrían ser desaprovechados cuando se asignan a un tanque cuya integridad es adecuada para el servicio utilizado.

También es frecuente que la detección del problema ocurra tardíamente debido a la acelerada degradación, que puede sorprender respecto a la expectativa de la vida útil del tanque.

La evaluación de tanques bajo condiciones controladas, proporciona información de la situación de integridad del fondo contribuyendo en la creación de cronogramas con niveles de prioridades para la actividad de mantenimiento de tanques.

Los principios en los que se basa la norma IRAM 725 son comunes a cada aplicación de ensayos por EA, donde los datos medidos contienen información relacionada con fuentes activas de EA. A partir de estas fuentes, se detecta un proceso continuo de corrosión, como por ejemplo una corrosión generalizada o una corrosión localizada, que da lugar a una pérdida progresiva de espesor de pared. De acuerdo con la ISO 8044:2015 Corrosion of metals and alloys. Basic terms and definitions, la corrosión generalizada es la que se extiende sobre toda la superficie del metal expuesto al medio ambiente corrosivo y la corrosión localizada es la que se concentra generalmente en sitios discretos de la superficie metálica, que puede dar lugar, por ejemplo, a picaduras, fisuras o grietas.

Un proceso de corrosión que se ha detenido no produce emisiones acústicas y, por lo tanto, no se detecta en el momento del ensayo.

2. LEGISLACIÓN NACIONAL

En nuestro país, desde la entrada en vigencia del Decreto 10877/60, reglamentando la Ley 13660, la seguridad de las instalaciones de almacenamiento, producción y elaboración de hidrocarburos y sus derivados está bajo la órbita de la Secretaría de Energía de la Nación, que es designada autoridad de aplicación.

A partir del año 1994, con la Res. 404, se establece la periodicidad y el mecanismo de inspección a refinerías de petróleo, a ser realizado por agentes autorizados por la Secretaría de Energía. Luego, en el año 2004, la resolución 1102 reorganiza todo el esquema de auditorías que para esta altura ya incluían instalaciones de elaboración, almacenamiento y distribución. Se establece la obligatoriedad de la inscripción en un registro nacional de todas las instalaciones y la aplicación de las resoluciones que obligan a la realización de las Auditorías.

En 2005, La Resolución 785 de la Secretaría de Energía establece el Programa Nacional de Control de Pérdidas de Tanques Aéreos de Almacenamiento de Hidrocarburos y sus derivados, cuyos principales objetivos son:

- a) Realizar un censo nacional de la cantidad y estado del parque de TAAH y sus derivados.
- b) Actualizar, organizar y sistematizar la información relativa a la infraestructura y logística.
- c) Realizar el control rutinario sobre las condiciones físicas de los TAAH
- d) Controlar y verificar las pérdidas y sus posibles efectos contaminantes sobre el medio ambiente.
- e) Impulsar y verificar la adopción de las medidas adecuadas para corregir, mitigar y contener la contaminación.

Esta resolución establece un esquema completo de inspecciones destinado a generar un legajo de cada tanque que cubra la vida del mismo, desde su construcción hasta su disposición final.

Sin embargo, esta normativa incluye un hecho que, debido a la complejidad del almacenamiento y logística de los hidrocarburos, la hace imposible de cumplir: la obligatoriedad de la realización de inspecciones internas a todo el parque de tanques nacional en un plazo de 180 días de entrada en vigencia la norma.

Luego de dos resoluciones extendiendo el plazo, la secretaría emite un documento complementario, el Subanexo V de la resolución, el cual establece específicamente la admisión de la técnica de EA para la evaluación de los fondos de los tanques, lo cual permite a los operadores avanzar en el cumplimiento de la resolución y programar con tiempo suficiente las aperturas de los tanques.

El subanexo presenta cuatro cuestiones principales:

- Establece una periodicidad máxima de validez del ensayo en 2 años

- Establece una repetitividad máxima de 3 ensayos consecutivos antes de la apertura
- Establece la necesidad de que los informes sean elevados con la firma original de los expertos Nivel 3 y Nivel 2 según IRAM-NM-ISO 9712 que lo supervisen y ejecuten
- Establece que el ensayo debe ser realizado bajo normativa ASTM E-1930, hasta que exista normativa IRAM específica en la materia (ensayos en fondos de tanques).

Este último punto resulta incumplible, ya que en el desarrollo de la ASTM-1930 se indica que la misma requiere que los sensores estén colocados en contacto con el objeto de estudio, en nuestro caso el piso, lo cual es imposible. Esta norma permite evaluar las envolventes de los tanques, pero no el fondo.

3. LA NORMA IRAM 725

La norma establece los principios generales del ensayo por emisión acústica (EA) realizado en recipientes metálicos llenos de líquido, destinado a la detección de procesos de corrosión que están activos en el momento del ensayo. Se aplica a tanques metálicos de almacenamiento, tales como los usados en la industria química y petroquímica.

Los resultados de este ensayo proporcionan datos cualitativos relativos a las condiciones del objeto de ensayo, y una recomendación respecto al tiempo máximo admisible que el recipiente ensayado puede continuar en operación hasta la próxima inspección. Esta recomendación se basa sobre las indicaciones de los ensayos mediante EA e información complementaria, con el fin de caracterizar las indicaciones de los ensayos mediante esta técnica.

En caso de tanques de almacenamiento de fondo plano, el procedimiento descrito en esta norma prevé el ensayo de la totalidad del fondo plano, de las paredes del tanque hasta la altura de llenado y, en el caso de tanques de techo flotante, también de las chapas del techo en contacto con el líquido almacenado.

4. CALIFICACIÓN DEL PERSONAL

Se recomienda que el personal que realiza los ensayos cumpla con la IRAM-NM-ISO 9712 para el método de EA, ya que de ese modo se puede garantizar su idoneidad técnica y su habilidad práctica para llevar a cabo la inspección.

Los operadores se pueden certificar en el país, en los métodos siguientes: Ultrasonidos, Radiografía industrial, Líquidos penetrantes, Partículas magnetizables, Corrientes inducidas, Flujo disperso y Ensayo visual, como así también en las técnicas de Ultrasonidos Limitado a Medición de Espesores (USE) y Radiografía Digital (RD).

Cabe mencionar que, si bien se han realizado algunas iniciativas, el país aún no cuenta con organismos de calificación y de certificación en el método de EA.

5. PREPARACIÓN DEL ENSAYO

El ensayo que se realiza para la detección de la corrosión en el fondo del tanque requiere cierta preparación previa del tanque. Se requiere un tiempo mínimo de reposo del producto de 24 horas a máxima altura y el cierre completo de las válvulas y de los sistemas de recirculación. Si el producto almacenado requiere calefacción para mantener una viscosidad aceptable que permita el desarrollo del ensayo, estos sistemas deben ser desconectados antes del inicio de la prueba.

Se debe verificar que las condiciones climáticas permitan desarrollar el ensayo. Por lo tanto, no se debe realizar el ensayo con lluvia o fuertes vientos, ya que son fuentes de ruido que interferirán en las señales.

Si las condiciones climáticas lo permiten, debe realizarse una inspección visual del tanque de almacenamiento y la zona del recinto alrededor, para identificar las posibles fuentes de ruido externo. Siempre hay que verificar que la altura de llenado sea la indicada por el operador, y en caso de no coincidir, tomar la correcta. Resulta de importancia verificar las dimensiones del tanque, posiciones de las conexiones y que no exista vegetación que pueda generar emisiones no deseadas en la superficie.

Los sensores se ubican equidistantes sobre la superficie del tanque, a una altura de 1 metro del suelo. La cantidad de sensores se determina según el perímetro del tanque. La norma indica una distancia sugerida de 13 metros entre cada sensor adyacente y un máximo de 15 metros, pero afirma que el ejecutante siempre debe verificar que los sensores contiguos se escuchen entre sí.

La norma expresa claramente que el mínimo número de sensores debe ser 6; pero con la consideración anterior, es posible en tanques de diámetro reducido, utilizar 4 sensores. En el caso de tanques de diámetros menores a 10 metros, no es recomendable utilizar 6 sensores, ya que las distancias cortas entre ellos permite a las ondas superficiales llegar más rápido a través de la pared y dificulta la ubicación de la posición de la fuente a través de las ondas longitudinales que viajan por el líquido.

Si el tanque posee fondo de agua o barro, es importante conocer el espesor de la capa mencionada, teniendo presente que el cambio de densidad afecta la transmisión de las ondas, e incluso puede causar su completa atenuación. Debe evaluarse la pertinencia de realizar el ensayo, especialmente en presencia de capas importantes de barro. Si el ensayo se considera posible, debe elevarse la altura de la posición de los sensores.

Una vez ubicadas las posiciones de los sensores, se deben establecer las posiciones de los sensores que actuarán como guardianes. La norma incluye como mandatorio el uso de los sensores de guarda porque esto permite filtrar todos los ruidos que se generan fuera de la zona de estudio, comprendida entre el anillo de sensores y el piso. Los sensores de guarda se ubican en una línea recta sobre los sensores del anillo.

La altura indicada por norma para la posición es idealmente a un metro por debajo de la interfaz del líquido; cuando por condiciones de seguridad esto no es posible, se deben ubicar al menos a 1 metro de distancia de los sensores del anillo. La altura recomendada, cuando la geometría del tanque lo permite, es entre 4 a 6 metros por sobre el anillo de adquisición.

Antes del montaje de los sensores sobre la estructura, se debe verificar el ruido de fondo que los sensores captan, con el equipo ya encendido. Estos datos son requeridos por la norma para asegurar que el ensayo se hizo en buenas condiciones de ruido de fondo ambiental.

Esta verificación dura 5 minutos y se registra completa en el software.

Luego se montan todos los sensores y se verifica el ruido de fondo de los mismos sobre la estructura, en un intervalo de 5 minutos. Esto permite a priori identificar si existen ruidos provenientes del interior del tanque, y permite identificar prematuramente posibles situaciones que pueden invalidar el ensayo (válvulas que no cierran, objetos desprendidos dentro del tanque, movimiento del producto, ruido externo de algún cuerpo sobre el tanque, etc). También es útil como una primera verificación del funcionamiento correcto del sensor.

Si el ruido de fondo monitorizado es mayor que 5 microvolt, se debe identificar la fuente del ruido. Si no se pudiera eliminar la fuente del ruido, se debe indicar la situación en el Formulario de Inspección.

Si el ruido de fondo está por debajo del valor indicado, permite establecer un umbral de detección bajo, el cual mejora las posibilidades de detectar la corrosión de baja intensidad.

Con los sensores ya montados, se procede a realizar su verificación mediante un ensayo Hsu- Nielsen a una distancia de 0,05 m del centro de cada sensor. Esto, además de verificar el correcto funcionamiento del sensor, establece un punto conocido de la geometría del tanque que permite luego calcular la velocidad del sonido dentro del tanque, valor que necesitamos conocer para poder localizar las fuentes de EA.

Luego se realiza una verificación con los sensores emitiendo como pulsadores, comandados remotamente desde la consola. En el caso de los sensores de guarda, esta verificación remota permite que el operador reduzca el riesgo de trabajar en altura.

La tolerancia admisible es de ± 3 dB desde la media del resto de los sensores

La norma requiere que ambas verificaciones sean registradas para que el ensayo se considere válido.

A partir de alguna de estas verificaciones, se calcula la velocidad aparente de la onda en el líquido. Este dato debe ser suministrado a los software de localización para poder detectar en tiempo real las zonas con actividad de EA.

6. ENSAYO DE EA

El ensayo se debe llevar a cabo durante un tiempo mínimo de una hora. Si el operador considera que necesita más tiempo para determinar una situación detectada en el mismo, o si existieran eventos climáticos (como ráfagas de viento intenso), ruido eléctrico (encendido de bombas o equipos en las cercanías) etc, el ensayo debe extenderse en periodos completos de media hora.

Durante el ensayo el operador debe registrar todos los eventos que afecten al ensayo (ráfagas de viento, presencia de personal, caída de objetos y herramientas).

Si durante el ensayo, existe una saturación de los canales de EA, el operador puede variar el umbral de adquisición teniendo en cuenta la necesidad de extender el plazo del ensayo.

Se debe registrar el ruido de fondo durante todo el ensayo.

Todo el ensayo y los registros mencionados deben ser resguardados para su análisis.

7. VALIDACIÓN

Finalizado el ensayo, se procede a realizar nuevamente un ensayo Hsu-Nielsen a cada sensor y la verificación por pulsadores.

Además de verificar que la tolerancia registrada debe ser de ± 3 dB desde la media del resto de los sensores, esta tolerancia aplica contra el registro de las verificaciones realizadas antes del ensayo.

Si existiera una diferencia en las medias de ambas verificaciones de ± 3 dB, el ensayo no es válido.

8. ANÁLISIS DE RESULTADOS

Con los datos adquiridos, los software de análisis permiten al operador filtrar las señales obtenidas durante el ensayo y ajustar los parámetros de localización para poder determinar la existencia de las fuentes de EA. Es importante tener cuidado en que el ruido aleatorio no influya sobre el resultado.

Deben identificarse los eventos de EA analizando las diferencias en los tiempos de llegada de los hits detectados. Con la ayuda de la velocidad aparente de la EA, se debe calcular la posición de cada evento de EA localizable. Los eventos localizados de EA cercanos entre sí se consideran como un único agrupamiento localizado y representan una fuente de EA.

En caso de la evaluación del fondo del tanque, los sensores de la segunda fila se utilizan como sensores guarda; las fuentes de EA situadas en posiciones más altas son, por lo tanto, eliminadas del estudio.

Los resultados de este análisis son luego interpretados en base a una clasificación de condición de los tanques.

9. CLASIFICACION DEL TANQUE

Para obtener la clasificación de los tanques se debe usar la actividad de las fuentes halladas (número de eventos de EA en una hora, en la zona de referencia del agrupamiento localizado) y la actividad de EA de la estructura.

El sistema de clasificación aplicado debe basarse en la tabla siguiente:

Grado	Criticidad	Período máximo recomendado hasta la próxima inspección
I	Baja	5 años
II	Media	2 años
III	Alta	1 año
IV	Muy alta	Apertura inmediata

El sistema de clasificación aplicado cubre el intervalo desde “ninguna fuente de EA hallada” (Grado I) hasta “fuente de EA severa hallada” (Grado IV) y aborda las condiciones intermedias en función de la actividad de las fuentes de EA.

En la norma se incluyeron dos anexos informativos los cuales brindan ejemplos de una clasificación cualitativa y otra cuantitativa, las cuales conducen a la aplicación de esta tabla.

10. INFORME DE RESULTADOS

El informe final debe incluir como mínimo lo siguiente, para que sea representativo del ensayo:

- a) alcance del ensayo;
- b) norma de aplicación (IRAM 725);
- c) instrucción escrita del ensayo y número de revisión;
- d) nombre del responsable y de los operadores del ensayo;
- e) fecha, lugar y emplazamiento del tanque en ensayo;
- f) descripción del tanque;
- g) producto almacenado y su nivel;
- h) descripción de la instrumentación de EA utilizada;
- i) número de sensores y su ubicación en el tanque, con evidencia fotográfica;
- j) umbral de detección del ensayo;
- k) planos de la estructura que muestran las fuentes de EA identificadas durante el ensayo;
- l) parámetros utilizados para la localización de las fuentes de EA (velocidad de las ondas de EA, parámetro geométrico para definir el agrupamiento localizado, tiempo de subida, y otros aplicables);
- m) descripción de las fuentes de EA;
- n) clasificación del tanque y período máximo recomendado hasta la próxima inspección según tabla 2.

El reporte es un elemento fundamental para el análisis y correlación de la historia del tanque en servicio, proporcionando información valiosa al respecto.

11. EJEMPLOS DE CRITERIOS DE CLASIFICACIÓN DE TANQUES

Se incluyeron dos anexos informativos los cuales brindan ejemplos de una clasificación cuantitativa y otra cualitativa, las cuales conducen a la aplicación de criticidad anteriormente desarrollada.

El Anexo A describe el desarrollo de un ejemplo de criterio de clasificación de tanques basado en parámetros cuantitativos de EA.

Tomando una configuración del equipo base y los valores obtenidos del ensayo, permitiendo definir los parámetros con los que se desarrolló el criterio de evaluación basado en: nivel de actividad de EA, nivel de energía, la ubicación en el plano (agrupamiento) y conteo de hits versus la correlación de amplitud.

El Anexo B nos da un ejemplo de criterio de clasificación de tanques basado en condición de piso (se basa en el aumento del peligro para la integridad de una estructura si se registra un aumento de la

actividad de EA) y actividad de EA (se basa en la amplitud y la energía acumulada en los agrupamientos localizados).

El análisis en conjunto nos permite asignar un criterio resultante y un período máximo recomendado hasta la próxima inspección, de acuerdo al grado correspondiente.

12. CONCLUSIONES

- La normalización de este ensayo permite el seguimiento en el tiempo de la evolución de la corrosión en un tanque. Dado que la Res. 785/05 plantea una repetitividad máxima del ensayo de EA de 3 ensayos seguidos, es posible realizar la comparación de los resultados de cada ensayo.
- La aplicación del procedimiento indicado en la norma establece los parámetros que debe contener el informe de ensayo, asegurando que los informes realizados por diferentes operadores y/u organizaciones sean comparables entre sí.
- Esta metodología permite optimizar recursos al evitar tener que sacar de servicio los tanques con el fondo en buen estado y aprovechar los recursos en los tanques que necesiten ser reparados. Los resultados normalizados permitirán a las compañías establecer cronogramas de apertura basados en la legislación y una mejora sustancial de los planes de integridad.
- Hay una disminución del impacto ambiental debido a que no es necesario remover los residuos depositados en el fondo del tanque (cuando se encuentra en buen estado).
- Se reduce la incertidumbre del estado del piso cuando no se abre e inspecciona el equipo, pudiendo detectar la presencia de procesos corrosivos o fugas, lo que conlleva a un mejor análisis de la inspección basada en riesgo (RBI) del tanque, para la evaluación del estado y de los intervalos de inspección.

REFERENCIAS

IRAM, Instituto Argentino de Normalización y Certificación, IRAM 725 Emisión acústica. Principios generales del ensayo por emisión acústica (EA) para la detección de la corrosión en un recipiente metálico lleno de líquido; 2019.

Montenegro A. N., Universidad Nacional del Comahue. Análisis para determinar una clasificación cualitativa del estado de fondos de tanques a partir de ensayos de emisión Acústica y su relación con el fenómeno de la corrosión activa; 2019.

Tellería G., GTI Internacional, Estudio e implementación de cuadro de clasificación cuantitativo para ensayos de emisión acústica en fondos de tanques en Argentina; 2019.

Resolución S.E. 785/05. Secretaría de Energía, Ministerio de Planificación Federal, Inversión Pública y Servicios. República Argentina.

NORMAS TÉCNICAS DE EMISIÓN ACÚSTICA EN ARGENTINA Y MERCOSUR

Semorile, M.

Gerencia de Mecánica y Metalurgia, IRAM Instituto Argentino de Normalización y Certificación, ARGENTINA

e-mail: msemorile@iram.org.ar

RESUMEN

La aplicación de ensayos por el método de Emisión Acústica para la detección y localización de defectos evolutivos en estructuras industriales, ha progresado notablemente en las últimas décadas en la República Argentina.

En función de los desarrollos científicos en laboratorios y de las distintas experiencias adquiridas en instalaciones y plantas, se generó la necesidad de contar con normas nacionales que ordenen la metodología, los criterios y las condiciones mínimas para asegurar ensayos confiables.

A comienzos del año 2000, se inicia la actividad de la Comisión de Emisión Acústica de IRAM, cuyas normas desarrolladas adquirieron un rápido reconocimiento.

En este trabajo, se explica cómo es el estudio de una norma nacional y cómo se participa activamente en la normalización regional (MERCOSUR) e internacional (ISO). También se informa sobre las normas IRAM y MERCOSUR vigentes y su campo de aplicación.

Palabras Clave: Ensayos no destructivos, Emisión acústica, Normas, Métodos de ensayo.

1. INTRODUCCIÓN

La normalización aplicada al método de emisión acústica tiene la finalidad de obtener un documento que establezca el procedimiento de ensayo y la metodología para la determinación de las diferentes características y magnitudes, como así también los equipos de medición, condiciones y parámetros de ensayo, muestreo y datos del informe.

Para este trabajo, se ha investigado en base a las actas de las reuniones de la Comisión de Emisión Acústica de IRAM y a las Actas de los Encuentros del Comité Sectorial Mercosur de Normalización de Ensayos No Destructivos, desde el año 2000 hasta el presente.

El objetivo de este trabajo de investigación es explicar cómo se lleva a cabo el estudio de una norma Argentina y cuáles son las ventajas de que una norma nacional finalmente se convierta en una norma Mercosur.

Se describe como se iniciaron las actividades de normalización nacional, cual fue la planificación de los primeros proyectos y quienes participaron de su desarrollo. También se describe de que se trata la normalización Mercosur, cuáles son sus objetivos y las reuniones realizadas.

2. NORMAS Y NORMALIZACIÓN

2.1 ¿Qué la normalización?

Según la ISO, International Organization for Standardization, es la actividad que tiene por objeto establecer, ante problemas reales o potenciales, disposiciones destinadas a usos comunes repetidos,

con el fin de obtener un nivel de ordenamiento óptimo, en un contexto dado, que puede ser tecnológico, político o económico.

2.2 ¿Qué es una norma?

Es un documento obtenido por consenso y aprobado por un organismo reconocido, que establece reglas y criterios para usos comunes y repetidos, es decir establece las condiciones mínimas que debe reunir un producto o servicio para que sirva al uso al que está destinado.

Una norma IRAM es un documento público que puede ser consultado, referenciado y utilizado por quienes lo deseen. Su aplicación es voluntaria, pero cuando es referenciado en una ley, decreto, resolución, código u ordenanza, pasan a tener carácter obligatorio.

JERARQUÍA DE LAS NORMAS



2.3 ¿Quién hace las normas?

Cada país tiene su Organismo Nacional de Normalización y en Argentina dicho organismo es IRAM, Instituto Argentino de Normalización y Certificación.

A nivel regional, IRAM forma parte de la COPANT, Comisión Panamericana de Normas Técnicas, y de la AMN, Asociación MERCOSUR de Normalización. La participación de IRAM en estos organismos se concreta canalizando las propuestas y coordinando los grupos de trabajo de los sectores argentinos que toman parte de las reuniones regionales de normalización.

A nivel internacional, IRAM es el representante argentino en la ISO, Organización Internacional de Normalización.

A continuación, se muestran los distintos niveles de las normas, en el plano internacional, regional y nacional, seguido por las especificaciones técnicas elaboradas por asociaciones y en la base se observan los documentos realizados por las empresas e instituciones.



En IRAM, el proceso de elaboración de normas, se hace a través de los Organismos de Estudio de Normas, con la participación de representantes de distintas organizaciones que pertenecen a los tres sectores involucrados en la creación de una norma: a) los productores y proveedores del tema a normalizar, para tener una participación representativa del mercado, b) los usuarios o consumidores del tema en cuestión y c) un tercer sector responsable de velar por el interés general y el bien común, pudiendo ser organismos gubernamentales, laboratorios de ensayo, asociaciones profesionales relacionadas y a algún sector académico que pudiese tener un interés o competencia legítima en el tema.

Todo el proceso se realiza, siempre, bajo los siguientes principios: participación balanceada, coherencia técnica, consenso y transparencia.

3. EL IRAM

El IRAM es una asociación civil sin fines de lucro fundada en 1935 como “Instituto Argentino de Racionalización de Materiales” por un grupo de instituciones públicas y privadas, con el objetivo de aglutinarse en una organización no gubernamental que sirviera de instrumento para desarrollar normas técnicas que en aquellos años requería la industria argentina, la cual se encontraba en pleno crecimiento.

En 1995, y dentro del marco del Sistema Nacional de Normas, Calidad y Certificación creado por el Decreto 1474/94 sancionado por el Poder Ejecutivo Nacional, la Secretaría de Industria de la Nación,

suscribe un convenio con el IRAM, designándolo Organismo Argentino de Normalización, para centralizar el estudio y aprobación de normas técnicas, base esencial de todo sistema nacional de calidad.

En 1996, bajo la misma sigla, pasa a denominarse: IRAM, Instituto Argentino de Normalización.

En febrero de 2004, la Inspección General de Justicia aprueba la reforma estatutaria por la cual el IRAM, bajo la misma sigla, pasa a denominarse con su nombre actual: IRAM, Instituto Argentino de Normalización y Certificación.

En 2018 se actualiza el Sistema Nacional de Calidad mediante el Decreto 1066/2018 sancionado por el Ministerio de Producción y Trabajo.

El IRAM tiene plena capacidad para obrar en el cumplimiento de sus fines a través de sus organismos directivos y de gestión, de acuerdo con las normas legales aplicables, su Estatuto Social y el Reglamento de Estudio de Normas y del Funcionamiento de sus Organismos Técnicos [1].

4. ¿COMO SE ESTUDIA UNA NORMA?

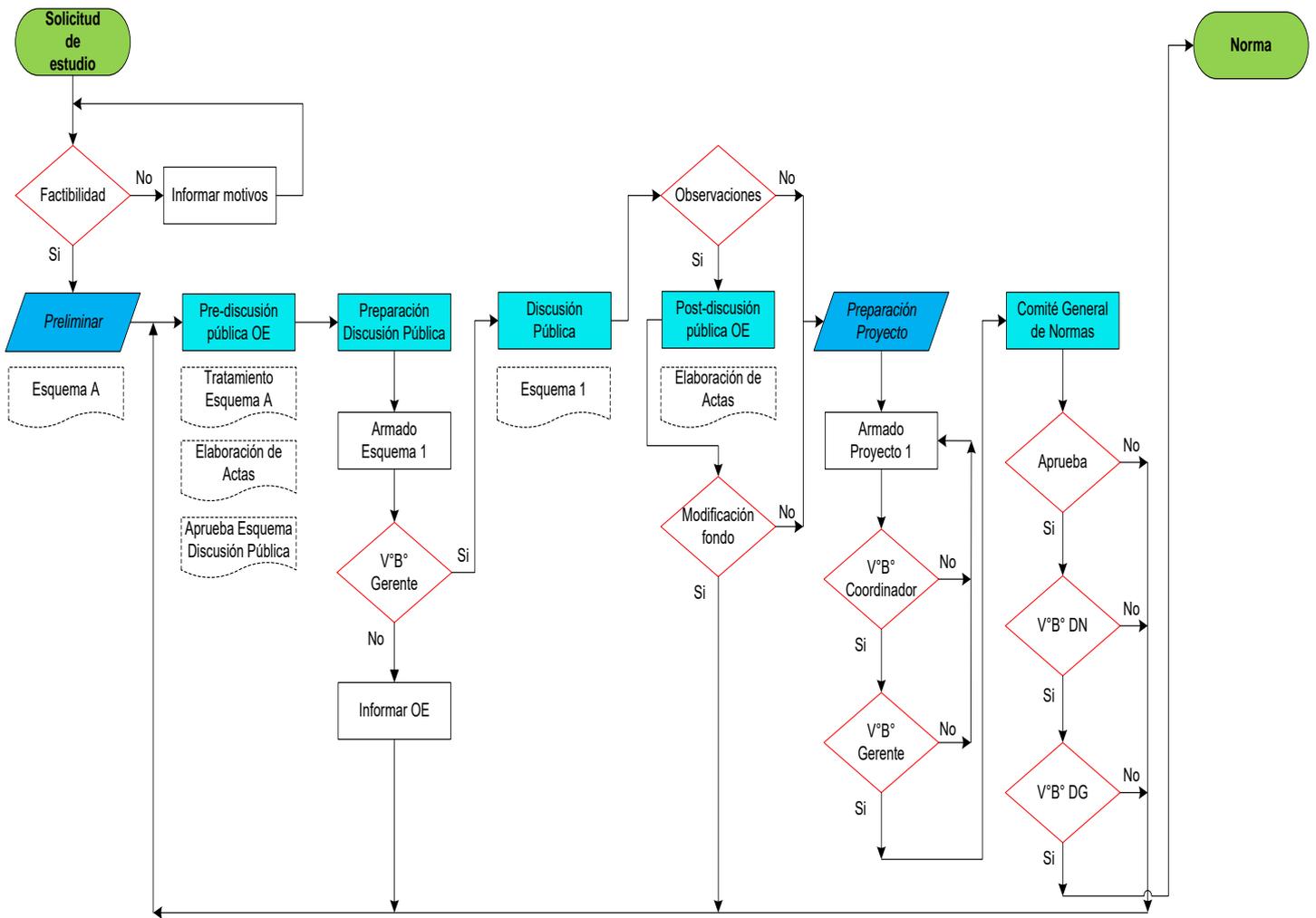
El estudio está a cargo de un Organismo conformado por representantes del área específica con la premisa de nuclear a los diversos sectores involucrados.

En la instancia preliminar se investiga si hay normas y documentos para utilizar como base para el armado del primer esquema.

En la siguiente instancia, el esquema se trata en las reuniones técnicas, en las cuales se analiza y se le introducen modificaciones. Logrado el primer consenso, el documento con el formato normalizado incorporado se eleva al Gerente de Mecánica y Metalurgia, el cual revisa y realiza sus observaciones. Según el tipo de observaciones, el documento puede volver al Organismo de Estudio o continuar el proceso hasta su envío a Discusión Pública (por e-mail). El esquema se envía a entidades y personas relacionadas con el tema, solicitándoles el envío por escrito de comentarios y observaciones fundamentadas.

El periodo de Discusión Pública lo establece el organismo de estudio y debe estar entre 30 y 180 días, cumpliendo de esta forma con uno de los principios fundamentales de la tarea de normalización, es decir que su tarea resulte de una democracia participativa en la que todos puedan emitir su opinión.

Finalizado el plazo, se trata nuevamente el esquema en las reuniones del Organismo de Estudio, conjuntamente con las observaciones que hubiesen llegado. Dichas observaciones son analizadas, para lo cual se invita a participar a los que las formularon, y se decide acerca de ellas, si se aceptan o no.



Una vez logrado el consenso final, se aprueba el documento como Proyecto y se eleva al Comité General de Normas quien lo revisa desde el punto de vista formal.

Si es aprobado, el Comité General de Normas lo remite a la Dirección General del IRAM para que lo sancione como norma. Luego se le da formato, se lo imprime y queda disponible al público en el Centro de Documentación de IRAM.

Las normas están en constante revisión y este proceso se reinicia cada vez que se formulan observaciones a las normas, sólidamente fundamentadas o bien cuando la norma se torna obsoleta debido a los avances científico-tecnológicos en el tema.

5. COMISIÓN DE EMISIÓN ACÚSTICA DE IRAM

La utilización de los ensayos por el método de Emisión Acústica ha evolucionado notoriamente en la República Argentina en las últimas décadas. Al ser uno de los métodos de ensayos no destructivos no convencionales, carecía de una difusión adecuada y resultaba difícil hallar personal con conocimientos en esta especialidad. Inclusive muchos profesionales e investigadores no siempre tenían la posibilidad de llevar sus conocimientos académicos y científicos a instalaciones reales donde realizar los ensayos.

Por este motivo, la industria manifiesta la necesidad de contar con normas nacionales que ordenen la metodología, los criterios y las condiciones mínimas para asegurar ensayos confiables.

El 20 de junio de 2000, con la coordinación del Ing. Adolfo Berganza, se realiza la primera reunión de la Comisión de Emisión Acústica de IRAM, donde participaron el Ing. Jorge Batista de Contegas, el Sr. Raúl Mañas de Tiseq, el Ing. Miguel Ángel Sabio Montero de la Universidad de San Juan y el Dr. José Ruzzante de CNEA, quien desempeñó la Secretaría Técnica.

En dicha reunión se planificó estudiar un documento que contemple el vocabulario utilizado en Emisión Acústica (que luego sería la IRAM 779) y luego otro, referente a la calibración de equipos. Asimismo, se acordó comenzar a elaborar la documentación correspondiente, para poder realizar la calificación de personal de Ensayos No Destructivos en este método.

En las reuniones sucesivas, se incorporaron representantes de ENARGAS, Camuzzi-Gas Pampeana, Repsol YPF, Facultad de Ingeniería de UBA, Dirección Nacional de Vialidad, IGA S.A., Polimeter S.A., Cerecil S.R.L., Ecotec Consultores S.A., Morken, Argentoil S.A., EDC S.A. Bureau Veritas Argentina S.A., Qualicontrol S.A., Axle S.A., HASA-PASA, DNA Dirección Nacional de Aeronavegabilidad, entre otras instituciones.

Durante el 2000, se realizaron 6 reuniones, siendo en la última que se comenzó a estudiar el Esquema A de norma IRAM 778. Ensayos no destructivos. Calibración secundaria de transductores de emisión acústica, aunque dicho estudio fue discontinuado, para dar lugar a otras prioridades.

El 20 de Enero de 2003 se publica la IRAM 779 Ensayos no destructivos. Ensayo por emisión acústica (EA) – Terminología.

El 27 de Marzo de 2003, IRAM solicita a la Asociación Mercosur de Normalización la creación del Comité Sectorial de Ensayos No destructivos, comenzando en un principio con el tema de Emisión Acústica. Ese mismo año se resuelve comenzar a estudiar una norma (que luego sería la IRAM 711) referente al ensayo de emisión acústica para cilindros de GNC, tomando como antecedente la norma brasileña ABNT NBR 13199.

El 10 de Septiembre de 2003 se publica la IRAM 776 Ensayos no destructivos. Análisis de la emisión acústica de estructuras durante la estimulación controlada.

El 25 de Marzo de 2004 se informa que ante el pedido de creación del Comité Sectorial Mercosur de END, respondieron afirmativamente ABNT (Brasil) e INTN (Paraguay), no recibiendo respuesta de UNIT (Uruguay). Asimismo se elaboró un plan de estudio Mercosur tentativo, el cual contemplaba los siguientes anteproyectos, basados en las normas IRAM:

- AntePrNM 24:01-00001 – Ensayos no destructivos. Ensayo por emisión acústica (EA) – Terminología.

- AntePrNM 24:01-00002 – Ensayos no destructivos. Análisis de la emisión acústica de estructuras durante la estimulación controlada.

- AntePrNM 24:01-00003 – Ensayos no destructivos. Ensayos de cilindros de acero sin costura por emisión acústica.

El 12 de Agosto de 2004, el Ing. Berganza informa que se ha creado el Comité Sectorial Mercosur de END (CSM 24), siendo ejercida la Secretaría Técnica por Argentina, por lo cual prepararía los anteproyectos de normas Mercosur, para su posterior consideración en el ámbito regional.

Durante los días 10 y 11 de noviembre de 2004 se realizó el 1º Encuentro Mercosur de Ensayos No Destructivos en Porto Alegre, Brasil, organizado por la Asociación Brasileira de Ensayos No Destructivos e Inspección (ABENDI).

La delegación Argentina estuvo integrada por el Ing. Adolfo Berganza de IRAM quien presidió el encuentro, por los Ings. César Belinco y José Scopelliti de la Asociación Argentina de Ensayos No Destructivos y Estructurales (AAENDE), por el Dr. José Ruzzante del Grupo Latinoamericano de Emisión Acústica (GLEA) y por el Ing. Miguel Ángel Maubro del Ente Nacional Regulador del Gas (ENARGAS).

El 17 de Marzo de 2005 se designa a la Dra. María Isabel LÓPEZ PUMAREGA de CNEA a cargo de la Secretaría Técnica de la Comisión de Emisión Acústica de IRAM, quien en mérito a su desempeño, fue reelegida sucesivamente en su cargo hasta fines de 2018.

A partir de allí, dicho organismo nacional comenzó a trabajar sólo en normas Mercosur, para que una vez publicadas, se adoptaran y se convirtieran en normas nacionales.

En el 2º Encuentro Mercosur, realizado durante los días 7 al 10 de Junio de 2005 en la ciudad de Salvador, Bahía, Brasil, se propuso la creación de 7 Subcomités, con la finalidad que las normas de cada método sean tratadas por sus respectivos especialistas:

- Emisión acústica
- Ultrasonidos
- Calificación y certificación de personal
- Radiografía industrial
- Métodos superficiales (LP, PM y visual)
- Corrientes inducidas
- Calibración

Los tres documentos en estudio (AntePrNM 24:00-00001/00002/00003), se encontraban en votación Mercosur.

Además se acordó elaborar 5 nuevos documentos Mercosur, los cuales se indican a continuación:

- Método de ensayo de tanques de almacenamiento metálicos a baja presión o atmosférica (Propuesta de Argentina)
- Ensayo por emisión acústica de tanques de fibra de vidrio reforzado (Propuesta de Argentina)
- Ensayo por emisión acústica de caños de resina termocurada (Propuesta de Argentina)
- Emisión Acústica en recipientes de presión metálicos durante el ensayo de presurización. Procedimiento (Propuesta de Brasil)
- Monitoreo continuo por emisión acústica (Propuesta de Brasil)

El 3º Encuentro Mercosur se realizó en la ciudad de Neuquén, Argentina, del 2 al 4 de Noviembre de 2005 en el marco del CORENDE, Congreso Regional de Ensayos No Destructivos y Estructurales.

Allí se anunció que se habían aprobado las tres primeras normas Mercosur del CSM N° 24 de END, siendo éstas las siguientes:

- NM 00302:2005 Ensayos no destructivos. Ensayo por emisión acústica (EA). Terminología. / Ensaios não destrutivos. Ensaio por emissão acústica (EA). Terminologia.
- NM 00303:2005 Ensayos no destructivos. Análisis de la emisión acústica de estructuras durante la estimulación controlada. / Ensaios não destrutivos. Análises da emissão acústica de estruturas durante a estimulação controlada.
- NM 00304:2005 Ensayos no destructivos. Ensayos de cilindros de acero sin costura por emisión acústica. / Ensaios não destrutivos. Ensaios de cilindros de aço sem costura por emissão acústica.

Una vez publicadas como normas Mercosur, cada país procede a adoptarlas como norma nacional. En el caso de IRAM, se mantiene la designación de la norma Mercosur, anteponiendo el acrónimo IRAM. Por ejemplo, IRAM NM 302.

En el 8º Encuentro Mercosur, realizado durante los días 11 y 12 de Mayo de 2009 en la ciudad de Salvador, Bahía, Brasil, se trabajó sobre siete proyectos y en la revisión de la NM 304.

El Ing. Mariano Semorile, coordinador de la Comisión de Emisión Acústica de IRAM, presidió el Encuentro Mercosur y la Ing. Alessandra Ferreira Alves de ABENDI desempeñó la Secretaría.

En el 11º Encuentro Mercosur, realizado durante los días 9 y 10 de Mayo de 2011 en la ciudad de Porto de Galinhas, Brasil, se anunció que se había aprobado la NM 326 sobre Montaje de sensores piezoeléctricos.

A fines del 2012 se publica la NM 333 Procedimiento para la monitorización continua y se publica la segunda edición (revisiones) de las NM 302, 303 y 304.

En el 14º Encuentro Mercosur, realizado durante los días 17 y 18 de Junio de 2013 en la ciudad de Porto de Galinhas, Brasil, se resuelve enviar a votación Mercosur la revisión de la NM 326 sobre Montaje de sensores piezoeléctricos. Asimismo, se aprueban tres proyectos y se amplía el plazo de consulta para otros dos proyectos.

En Febrero de 2019, como resultado del proceso de revisión sistemática de Normas MERCOSUR, se confirman las normas NM 326, NM 337, NM 338, NM 339, NM 340 y NM 341, publicadas originalmente en 2014.

En mayo de 2019 se realizó en Rio de Janeiro, Brasil, el 23º Encuentro Mercosur, en el cual se aprobaron los proyectos de las NM 302, NM 303 y NM 304, y se resolvió enviar a votación Mercosur la revisión de la NM 333 de Monitorización continua por EA y la adopción idéntica de la ISO 18081 de Detección de fugas mediante EA.

De este modo, se evidencia que las normas están en constante revisión y este proceso se reinicia cada vez que se formulen nuevas observaciones a las normas.

6. NORMALIZACIÓN MERCOSUR

6.1 Países miembros

La Asociación Mercosur de Normalización, está compuesta por los siguientes miembros asociados:

- ARGENTINA - IRAM – Instituto Argentino de Normalización y Certificación
- BRASIL - ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas
- PARAGUAY - INTN - Instituto Nacional de Tecnología, Normalización y Metrología

- URUGUAY - UNIT - Instituto Uruguayo de Normas Técnicas

Además, cuenta con los siguientes miembros adherentes:

- BOLIVIA - IBNORCA - Instituto Boliviano de Normalización y Calidad
- CHILE - INN - Instituto Nacional de Normalización

6.2 Objetivos principales

Los objetivos principales son:

- Elaboración de normas regionales de interés.
- Promover la cooperación entre los miembros para facilitar la armonización de sus normas.
- Armonizar las posiciones políticas y técnicas de sus miembros en la armonización internacional (ISO, IEC, etc.)
- Promover la capacitación en normalización, calidad, etc.
- Fomentar el desarrollo de sistemas de certificación y su reconocimiento mutuo.

6.3 Funciones de la Secretaría Técnica [2]

IRAM ejerce la Secretaría Técnica del Comité Sectorial Mercosur - CSM 24 de Ensayos No Destructivos, cuyas funciones principales son:

- Solicitar a los países miembros la elaboración de Anteproyectos y Proyectos
- Recibir y circular las solicitudes de revisión de normas
- Coordinar los SCM creados por los CSM
- Elaborar anualmente informes de las actividades del CSM y SCM y elevarlos al CMN
- Incluir nuevos temas en el programa anual y mantener el control
- Preparar y organizar las reuniones técnicas
- Autenticar un ejemplar de la propuesta de NM y enviarla a la Secretaría Ejecutiva del CMN
- Otras actividades

6.4 Organización de las Reuniones Técnicas

- Se circula un temario por un plazo de 60 días y la ST elabora el definitivo.
- La ST informa por nota sobre las reuniones
- La ST circula los documentos a estudiar 90 días antes
- La ST da las instrucciones
- La ST 30 días antes de la reunión, pide los datos de los integrantes.
- Los miembros formulan las observaciones 15 días antes de la reunión

6.5 Realización de las Reuniones Técnicas

Se realizan cuando estén presentes, como mínimo, dos jefes de las delegaciones de los países miembros del CSM o SCM

Los jefes de las delegaciones estarán acreditados por los Organismos Nacionales.

En las reuniones se determinará:

- Elección de presidente
- Procedimientos a seguir .
- Decisiones sobre los documentos aprobados, no aprobados, no tratados.
- Circulación de los documentos.
- Temarios de próximas reuniones.
- Forma del Acta

Luego de haber trabajado en conjunto a nivel Mercosur, principalmente con Brasil, se destaca la transferencia mutua de conocimientos y se concluye que es conveniente para los países coordinar esfuerzo para lograr mejores resultados con menos recursos.

Se ha verificado en varias oportunidades que dos o más países han realizado en forma individual el desarrollo de una norma con campos de aplicación similares.

Las normas argentinas cuyo texto ha sido utilizado como base para la norma Mercosur presentan como ventaja poder continuar utilizando el mismo procedimiento donde se tiene un destacado expertise y eliminar posibles barreras técnicas y comerciales.

7. REUNIONES MERCOSUR REALIZADAS

- 1° Porto Alegre, Brasil 2004/11/10 y 11
- 2° Salvador de Bahía, Brasil 2005/06/7 al 10
- 3° Neuquén, Argentina 2005/11/1 al 4
- 4° San Pablo, Brasil 2006/07/27 y 28
- 5° Salvador de Bahía, Brasil 2007/06/11
- 6° Buenos Aires, Argentina 2007/10/22 y 23
- 7° San Pablo, Brasil 2008/06/09
- 8° Salvador de Bahía, Brasil 2009/05/11 y 12
- 9° Rosario, Argentina 2009/11/10
- 10°. Santos, Brasil 2010/06/21 y 22
- 11° Porto de Galinhas, Brasil 2011/05/9 y 10
- 12° Campana, BA, Argentina 2011/08/9 y 10
- 13° San Pablo, Brasil 2012/07/16 y 17
- 14° Porto de Galinhas, Brasil 2013/06/17 y 18
- 15° Mar del Plata, BA, Argentina 2013/10/1 y 2.
- 16° San Pablo, Brasil 2014/08/18
- 17° Cabo de San Agostinho, PE, Brasil 2015/06/15 y 16
- 18° Buenos Aires, Argentina, 2015/11/30
- 19° San Pablo, Brasil 2016/08/22
- 20° Rio de Janeiro, Brasil 2017/05/18
- 21° Neuquén, Argentina 2017/10/03
- 22° San Pablo, Brasil 2018/08/28
- 23° Rio de Janeiro, Brasil 2019/05/27
- 24° Buenos Aires, Argentina, 2019/Nov

8. ISO TC135/SC9

Como información adicional, se informa que el organismo de estudio de normas internacionales que tiene competencia en Emisión Acústica es el Subcomité 9 perteneciente al Comité Técnico 135 de ISO, cuya primera reunión se realizó en Buenos Aires, Argentina, durante la IV Conferencia

Panamericana de Ensayos No Destructivos, organizada por AAENDE. Dicho organismo se ha reunido en las siguientes oportunidades:

- 1° 2007 Buenos Aires, Argentina
- 2° 2009 Salvador de Bahía, Brasil
- 3° 2010 Moscú, Rusia
2010 Viena, Austria WG1 Metal Materials
- 4° 2011 Porto de Galinhas, Brasil
- 5° 2012 Durban, Sudáfrica
- 6° 2013 Porto de Galinhas, Brasil
- 7° 2014 Praga, República Checa
- 8° 2015 San Pablo, Brasil
- 9° 2016 Munich, Alemania
- 10° 2019 Guangzhou Shi, China

Las normas del ISO TC135/SC9 han sido desarrolladas por los siguientes Working Groups:

- WG 1 - Metal Materials;
- WG 2 - Composite Materials;
- WG 3 - Leak Detections;
- WG 4 - Acoustic Emission Technology;
- WG5 - Acoustic emission testing on cranes
- WG6 - Revision of ISO 12714
- WG7 - Revision of ISO 12716

Una vez finalizado su trabajo, estos working group han sido disueltos.

Un hecho que merece una mención especial, es que la Dra. María Isabel López Pumarega, de la Comisión Nacional de Energía Atómica, se desempeñó como Convenor del Working Group 3, Leak Detection, durante los años 2013 y 2014. Este Working Group desarrolló la norma ISO 18081 Non-destructive testing. Acoustic emission testing (AT). Leak detection by means of acoustic emission.

Recientemente se creó un nuevo working group “Acoustic emission testing of metallic structures” para trabajar el primer borrador de norma ISO NP 24489 Draft - AE testing of corrosion of atmospheric pressure metallic storage tank floor.

9. NORMAS ARGENTINAS

9.1 Normas publicadas

Las normas publicadas vigentes, se indican a continuación:

- **IRAM-NM 302 Ensayos no destructivos. Ensayo de emisión acústica (EA). Terminología (Antes IRAM 779)**

Esta Norma MERCOSUR define los términos para una comprensión e interpretación precisa del ensayo por emisión acústica.

- **IRAM-NM 303 Ensayos no destructivos. Análisis de la emisión acústica de estructuras durante la estimulación controlada. (Antes IRAM 776)**

Esta Norma MERCOSUR establece las directrices para el análisis de la emisión acústica de estructuras que se pueden tensionar por medios mecánicos o térmicos.

Las funciones básicas de un sistema de análisis de EA son detectar, localizar y clasificar fuentes de emisiones. Se pueden usar otros métodos de ensayos no destructivos para una evaluación más amplia del origen de las fuentes de EA.

- **IRAM-NM 304 Ensayos no destructivos. Ensayos de cilindros de acero sin costura por emisión acústica. (Antes IRAM 711)**

Esta Norma MERCOSUR establece el método de ensayo por emisión acústica, aplicable en cilindros de acero sin costura para el almacenamiento de gas comprimido y no es aplicable en cilindros que trabajan en condiciones criogénicas.

- **IRAM-NM 326 Ensayos no destructivos. Montaje de sensores piezoeléctricos de contacto para emisión acústica. Procedimiento**

Esta Norma MERCOSUR establece el procedimiento para el montaje de sensores piezoeléctricos de contacto para emisión acústica.

- **IRAM-NM 333 Ensayos no destructivos. Monitorización continua por emisión acústica de recipientes a presión. Procedimiento**

Esta Norma MERCOSUR establece el procedimiento a utilizar durante la monitorización continua por emisión acústica (EA) de componentes metálicos o no, utilizados en servicios nucleares u otros, que estén sometidos a esfuerzos. La monitorización se puede realizar en función de la carga, presión, temperatura, tiempo o una combinación de ellos.

Esta Norma MERCOSUR tiene como objeto detectar, localizar y caracterizar fuentes de EA e interpretar las señales de respuesta de EA para evaluar su significado relacionado con la integridad del recipiente monitorizado bajo presión. Estas fuentes de EA están limitadas a aquellas activas durante la operación del componente en ensayo, o sea, ninguna carga especial se aplica exclusivamente para producir la EA. En el contexto de esta Norma, la operación normal del sistema puede incluir la rutina del ensayo de presión realizado durante la parada de planta.

- **IRAM-NM 337 Ensayos no destructivos – Ensayo de emisión acústica en recipientes y tanques de plástico reforzado con fibra de vidrio (PRFV) – Procedimiento.**

Esta Norma establece los requisitos para el ensayo de emisión acústica de recipientes y tanques de plástico reforzado con fibra de vidrio (PRFV) a presión o vacío para determinar su integridad estructural.

Las presiones de ensayo y de vacío se establecen utilizando el código de diseño del equipo ensayado.

Se puede aplicar a los ensayos de equipos nuevos o en servicio.

Describe la aplicación de incrementos de presión o de vacío, mientras se realiza la monitorización a través de sensores sensibles a las señales de EA, causadas por defectos en desarrollo en los equipos ensayados.

También establece los lineamientos para determinar la localización y la severidad de los defectos estructurales, con criterios de aceptación para evaluar la integridad estructural del equipo de PRFV.

La presión máxima de ensayo (hidrostática o vacío) para el equipo de PRFV se determina considerando la máxima presión de operación e información aportada por el usuario, y según los códigos y la legislación local.

Esta Norma también se recomienda para determinar la integridad estructural de los equipos en servicio, normalmente con una interrupción mínima del proceso productivo.

- **IRAM-NM 338 Ensayos no destructivos – Ensayo de emisión acústica en tubos reforzados con resina termocurada - Procedimiento**

Esta Norma establece los requisitos mínimos para la inspección o monitorización por emisión acústica de tubos reforzados de resina termocurada (TRRT), para determinar su integridad estructural. Se aplica a tubos, accesorios, uniones y tuberías.

Esta Norma se aplica a tubos fabricados con fibra de vidrio y fibra de carbono, reforzados con contenido de refuerzo mayor que 15% en masa. La aplicabilidad de este procedimiento se debe demostrar antes de su utilización en tuberías construidas con materiales de refuerzo.

Esta Norma consiste en exponer los TRRT a un incremento de la presión o a un ciclo de presión, mientras que es monitorizado con sensores de EA. Cuando sea apropiado, se pueden superponer o reemplazar otros tipos de carga a la presión, como por ejemplo, térmica, doblado, tensión, etc. En esta Norma se describen el sistema de medición y la técnica para detección y análisis de los datos de EA.

Esta Norma establece procedimientos para determinar la ubicación y la severidad de discontinuidades estructurales en los TRRT.

Esta Norma se aplica a ensayos de presión absoluta menores que 35 MPa (350 kgf/cm²).

Esta Norma se aplica a tuberías de diámetro menor o igual a 600 mm. Los tubos de diámetros mayores se pueden inspeccionar con EA, sin embargo dichos ensayos se encuentran fuera del alcance de esta Norma.

Esta Norma se aplica a tuberías en servicio en condiciones normales de operación, para determinar la integridad estructural de los TRRT en servicio, con una interrupción del proceso mínima.

- **IRAM-NM 339 Ensayos no destructivos – Emisión acústica en recipientes metálicos a presión durante el ensayo de presión - Procedimiento**

Esta Norma MERCOSUR establece el procedimiento para realizar el ensayo por emisión acústica en recipientes metálicos a presión durante el ensayo de presión, para localizar y monitorear fuentes de

emisión causadas por discontinuidades en las superficies externas e internas en la pared del recipiente a presión, en soldaduras y en otros componentes que formen parte del recipiente.

- **IRAM-NM 340 Ensayos no destructivos – Ensayo de emisión acústica en tanques metálicos de almacenamiento, con líquidos a presión atmosférica y baja presión.**

Esta norma establece las directrices para el método de ensayo de emisión acústica de tanques de almacenamiento no enterrados, nuevos o en servicio.

Este método de ensayo detecta EA en el área de cobertura del sensor que está sometida a esfuerzo durante el ensayo. Para tanques de fondo plano estas áreas incluyen en general las paredes laterales, y el techo si la presión se aplica sobre el nivel del líquido. Esta norma se aplica a la inspección de tanques atmosféricos y cuando los sensores no están colocados en el fondo, el ensayo puede no detectar algunas fallas en el fondo del tanque.

Este método de ensayo puede requerir que el tanque experimente una carga mayor que la normal de funcionamiento. Generalmente el contenido normal del tanque se puede utilizar para aplicar esta carga.

Este método de ensayo no se aplica a tanques cuya presión prevista de operación sea mayor que la presión de ensayo. Cuando en la ejecución del ensayo se utiliza otro contenido distinto al utilizado en la operación normal, se debe calcular el nivel máximo de producto para realizar el ensayo en función de su densidad, de forma de garantizar que los esfuerzos actuantes tengan como mínimo la misma magnitud que los del producto normal de operación del tanque.

No es necesario desagotar o limpiar el tanque antes de realizar este ensayo.

Este método de ensayo se aplica a tanques de acero, acero inoxidable, aluminio y otros metales.

Este método de ensayo también puede detectar defectos en recubrimientos interiores de tanques, por ejemplo fenólicos y otros materiales quebradizos.

Los datos obtenidos por EA se utilizan para detectar y localizar fuentes de emisión. Se pueden utilizar otros métodos de ensayos no destructivos (END) para confirmar la naturaleza y la importancia de las indicaciones de EA.

Durante la realización de este ensayo se pueden encontrar pérdidas, aunque su detección no es la finalidad de este método de ensayo.

- **IRAM-NM 341 Ensayos no destructivos – Ensayo de emisión acústica – Verificación de sensores**

Esta Norma establece un procedimiento para la calibración de sensores de emisión acústica, a partir de la calibración primaria de un sensor de EA de referencia.

- **IRAM 725 Ensayos no destructivos – Emisión acústica. Principios generales del ensayo por emisión acústica (EA) para la detección de la corrosión en un recipiente metálico lleno de líquido**

Esta norma establece los principios generales del ensayo por EA efectuado en recipientes metálicos llenos de líquido, destinado a la detección de procesos de corrosión que están activos en el momento del ensayo. Se aplica a tanques metálicos de almacenamiento, tales como los usados en la industria química y petroquímica.

Los resultados de este ensayo proporcionan datos cualitativos relativos a las condiciones del objeto de ensayo, y una recomendación respecto al tiempo máximo admisible que el recipiente ensayado puede continuar en operación hasta la próxima inspección. Esta recomendación se basa sobre las indicaciones de los ensayos mediante EA e información complementaria, con el fin de caracterizar las indicaciones de los ensayos mediante esta técnica.

En caso de tanques de almacenamiento de fondo plano, el procedimiento descrito en esta norma prevé el ensayo de la totalidad del fondo plano, de las paredes del tanque hasta la altura de llenado y, en el caso de tanques de techo flotante, también las chapas del techo en contacto con el líquido almacenado.

- **IRAM 769-1 Ensayos no destructivos. Emisión acústica. Caracterización del equipo. Parte 1: Descripción del equipo**

Esta norma describe los principales factores que constituyen un sistema de inspección por emisión acústica (EA):

- detección;
- acondicionamiento de las señales;
- medición de las señales; y
- salida y análisis de resultados.

9.2 Proyectos en estudio

- **IRAM-NM-ISO 18081 Ensayos no destructivos. Ensayo de emisión acústica. Detección de fugas mediante emisión acústica (ISO 18081:2016, IDT)**

Esta Norma establece los principios generales necesarios para la detección de fugas mediante ensayos de emisión acústica (EA), y está orientada a la aplicación del método en las estructuras y los componentes, en los que se produce un caudal de fuga como resultado de las diferencias de presión y genera EA.

En esta Norma se describen los fenómenos de la generación de EA y la influencia de la naturaleza de los fluidos, de la forma del orificio, de la propagación de las ondas y del medio ambiente.

Se tratan los diferentes métodos de aplicación, los instrumentos y la presentación de los resultados de EA. Asimismo, esta Norma contiene las directrices para la preparación de los documentos de aplicación que describen los requisitos específicos para la aplicación del método de EA.

Se facilitan diferentes ejemplos de aplicación.

- **IRAM 769-2 Ensayos no destructivos. Emisión acústica. Caracterización del equipo. Parte 2: Verificación de las características de funcionamiento.**

Esta Norma establece los métodos para la verificación rutinaria del funcionamiento del equipo de EA con uno o más canales de detección. Está destinada a los operadores de un equipo en condiciones de laboratorio. Los procedimientos descritos en esta norma no excluyen otros métodos calificados (alternativos, válidos), por ejemplo la verificación en el dominio de frecuencias.

Se recomienda verificar las características de medición después de la compra del equipo, de modificaciones, de uso en condiciones extraordinarias, o en caso de sospecha de fallo en el funcionamiento.

10. CONCLUSIONES

Siendo cada vez más amplio el campo de aplicación de la emisión acústica, resulta fundamental contar con normas que ordenen la metodología, los criterios y las condiciones mínimas para asegurar ensayos confiables.

Se ha logrado una sinergia con otros Organismos Nacionales de Normalización del Mercosur en el campo de la emisión acústica, coordinando esfuerzos para lograr mejores resultados con menos recursos.

Al realizar una planificación regional, se evita que dos o más países realicen en forma individual estudios de normas con campos de aplicación similares.

Las normas argentinas cuyo texto ha sido utilizado como base para la norma Mercosur, presentan como ventaja poder continuar utilizando el mismo procedimiento donde se tiene un destacado expertise y eliminar posibles barreras técnicas y comerciales.

El estudio de una norma es un proceso dinámico, que se reinicia cada vez que el documento recibe observaciones fundamentadas, que pueden derivar en una modificación, corrección o revisión.

REFERENCIAS

[1] IRAM. Reglamento de Estudio de Normas y de sus Organismos Técnicos. 1997

[2] AMN. Asociación Mercosur de Normalización. Directivas AMN, Parte 1. Procedimiento para la elaboración de normas Mercosur. 2018.

A REDUCED ORDER MODEL OF WAVE PROPAGATION AND VIBRATIONS IN RODS AND TUBES OF UNIFORM CROSS SECTIONS

Suárez Antola R.^{a,b}

^aMinisterio de Industria, Energía y Minería, Uruguay

^bOMNIA Sciences/Technologies /Services, Uruguay

e-mail: robertosua@gmail.com

RESUMEN

After a short historical survey of some work done on the linear theory of longitudinal vibrations and wave propagation in rods and tubes of uniform cross-section, a reduced order mathematical model (ROM) for wave propagation and vibrations in rods and tubes is proposed selecting three propagation modes (one extensional and two shear modes) with dispersion relations corresponding to mixed boundary conditions. These modes are coupled in order to approximately comply with zero-stress boundary conditions. The coupling gives a set of operator equations in the mode amplitudes, with time and a single space coordinate (along the axis of symmetry of the rod or tube) as independent variables: these are the ROM's equations. The model is general enough to describe vibrations and wave propagation in rods and tubes made of linear hereditary solids. The analysis of wave propagation and vibrations is then restricted to linear elastic materials, focused in either very low frequency or very high frequency phenomena. Analytical formulae for group velocities are derived, as well as asymptotic expressions for the propagation of mode amplitudes. A simplified theoretical framework to study mechanical resonance in bars of any cross section is derived. A comparison with experimental results is done. The limitations and pitfalls of the model are assessed, and new experiments and digital simulations are suggested to test some of its predictions.

Palabras Clave: mechanical vibrations, wave propagation, hereditary-elastic materials, propagation modes in rods and tubes, reduced order models.

1. INTRODUCTION

Longitudinal vibrations and wave propagation in rods and tubes, by themselves or coupled with torsional or flexural wave motion, appear in the classical fields of civil, mechanical, electrical and aerospace engineering, of non-destructive testing, and in the new fields of mechatronics and micro-electromechanical systems.

The mathematical study of longitudinal vibrations began almost three centuries ago.

For an infinite cylindrical and linear elastic waveguide, with zero stress boundary conditions and assuming a purely sinusoidal time dependence, the abovementioned equations of the dynamic theory of elasticity were posed in cylindrical coordinates and solved by separation of variables by Pochhammer as early as in 1876 (Kolsky, 1963, pp.54-59). The boundary conditions then give a transcendental equation that relates the **angular frequency** ω with the **wave number** k along the axis of the rod: the so called dispersion relation, in terms of Bessel functions. Assuming a suitable spatial symmetry (to eliminate flexural and torsional vibrations) a numerable infinity of propagation

modes is obtained from the aforementioned dispersion relation. Each mode is characterized by a definite connection between ω and k , as well as by certain typical space patterns of strain and stress. In principle, by superposition of the contributions of the different modes and the different frequencies that belong to an elastic pulse or wave pattern, we can follow the propagation and distortion of the pattern along the axis of a bar. In the case of finite cylinders, realistic boundary conditions at the end plane cross sections introduced seemingly insurmountable additional complications to obtain a solution by separation of variables in the partial differential equations (Nadeau, 1964, pp.268-271). This analytical approach could be extended to cylindrical tubes, but always with increasing difficulties. However, some work along these lines was done at the end of the fifties and during the sixties, including some extensions to wave propagation and vibrations of hereditary materials in rods. It was soon realized that it may be actually easier to make an ab-initio numerical analysis without the introduction of the mode concept and without spectral decomposition of the wave pattern. This is the contemporary trend, fostered by the increase in computer power and the development of high-quality numerical algorithms.

But even with the present computing facilities, the problem of longitudinal vibrations and wave propagation can be difficult to tackle in certain cases of practical interest, even if internal friction is neglected. One disadvantage of digital simulations is that, sometimes, they don't show clearly the effects of changing the physical parameters in the problem.

So, a simplified analytical approach may be of interest, both as a guide for the design of ab-initio digital simulations of wave propagation or vibrations, and for the interpretation of experimental results.

The main purpose of this work is to propose a fairly general reduced order model (ROM) model for longitudinal vibration and wave propagation in bars or tubes that can be applied both to linear elastic and hereditary materials. Then linear elastic materials are considered. The results already obtained by the author in relation with high frequency wave propagation and low frequency vibrations in rods are briefly reviewed.

The key concept for ROM construction in acoustic of solids (elastic waves and vibrations) is a phenomenon very important in many branches of engineering and physics: **wave coupling** (Pierce, 1954).

Let us summarize its main features. If the dispersion curves of two uncoupled modes of propagation cross each other one or several times, when a phenomenological coupling between them is introduced, the resulting dispersion curves for the coupled modes split from the crossover points. If the phenomenological coupling is mild, the new dispersion curves nearly coincide, far from these intersection points, with part of the curves corresponding to the uncoupled modes. However, if the coupling is strong enough, a coupled mode may behave very differently from an uncoupled one, even far from the abovementioned cross section points.

All these properties of wave coupling will be used to construct the reduced order mathematical models proposed in this paper. But let us make first a brief review of the previous work related with the construction of simple analytical models of longitudinal vibrations and waves in rods.

Modal analysis of wave propagation is amenable to an analytical approach, as the one intended here, if it can be done using only a few modes (two or three).

There is another idea that we will borrow in order to construct a simplified mathematical model for longitudinal wave propagation. According to the results obtained by the computing group of Bell Telephone Laboratories, in connection with early delay line studies (Mc Skimin, 1956), the dispersion relation of the lowest mode of a fluid waveguide behaves very similar to the dispersion relation of the lowest mode corresponding to predominantly longitudinal waves, in the solid rod, as predicted by the equations of dynamics elasticity.

This suggested the introduction of the concept of "**almost-fluid waveguide**" to describe with a maximum of simplicity the propagation of high frequency longitudinal waves in solid bars (Suárez-Antola, 1990 and 1998, Suárez-Ántola and Suárez-Bagnasco, 1999). Then, in order to comply with the almost-fluid waveguide concept, we will require that the dispersion relation for the highest mode of propagation of our intended model must be: (a) asymptotic to $\omega = v_L \cdot k$ when k tends to infinity, and (b) near the dispersion relation of the first mode of the almost fluid waveguide for k big enough.

Besides the aforementioned **lower extensional-surface mode** and the **higher shear-dilatational modes**, the exact dispersion equation shows **a third kind of propagation mode**. The phase velocity is in this case asymptotic to v_T when k tends to infinity (asymptotic shear mode). But the group velocity of the main asymptotic shear mode, considered as a function of $k \cdot R$, presents a significant maximum (less than v_E) followed by a less significant minimum (higher than the minimum of the group velocity of the extensional surface mode) before approaching asymptotically to v_T (Kolsky, 1963, Fig.15). As a consequence of all this, to study the propagation of short longitudinal pulses (like very short ultrasonic pulses with a wide spectrum of frequencies), we will require three branches to the dispersion equation obtained from our model: a lower extensional-surface branch, an asymptotically shear branch in the middle, and an upper asymptotically dilatational branch.

2. METHODS OF ROM CONSTRUCTION

Let us begin by considering a pure extensional mode with dispersion equation $\omega = v_E \cdot k$, and two shear modes with dispersion equations:

$$\omega^2 = \omega_{c1}^2 + v_T^2 \cdot k^2 \qquad \omega^2 = \omega_{c2}^2 + v_T^2 \cdot k^2$$

For a rod the cut-off frequencies are given by the equations:

$$\omega_{c1} = \frac{\alpha_{T1} \cdot v_T}{R} \qquad \omega_{c2} = \frac{\alpha_{T2} \cdot v_T}{R}$$

α_{T1} and α_{T2} are pure numbers, with α_{T1} less than α_{T2} . For the two lower and usually dominant modes we have $\alpha_{T1} = 3.83$ and $\alpha_{T2} = 7.02$. These dispersion equations for the shear modes are obtained after solving the equations of elasto-dynamics for an infinite waveguide of circular cross section, using mixed boundary conditions instead of the stress-free boundary conditions imposed by Pochhammer and Chree (Auld, 1973, p.113). Mixed boundary conditions means here that the radial component of displacement s_r and the axial component of stress $\sigma_{r,z}$ are both zero at the boundary of the waveguide, that is, when $r = R$. The extensional mode also verifies mixed boundary conditions, because in this case only s_z and $\sigma_{z,z}$ may be different from zero. However,

this mode is not an exact solution of the full equations of dynamics elasticity, since it neglects the lateral contraction or dilatation due to Poisson's effect.

As v_E is greater than v_T , we see that the curves that represent the dispersion equations of the shear modes intersect the straight line that represents the dispersion equation of the extensional mode in the ω - k plane.

Now, the **strong coupling** of intersecting modes obtained using mixed boundary conditions produce new emerging modes that can be used to describe several features of the case with stress-free boundary conditions (Achenbach, 1973; Auld, 1973).

However, each shear mode intersects the extensional mode (the extensional mode couples with both shear modes), but the shear modes don't intersect (each shear mode couples only with the extensional mode). So, let us construct a model for the propagation of longitudinal pulses in linear elastic rods of uniform transverse sections, coupling three one dimensional equations that correspond to intersecting modes of propagation, as follows:

$$\rho \frac{\partial^2 A}{\partial t^2} = \frac{\partial \sigma}{\partial z} + \rho \cdot f \quad (1a)$$

$$\rho \frac{\partial^2 B_1}{\partial t^2} + \rho \omega_{c,1}^2 B_1 = \frac{\partial \tau_1}{\partial z} + \rho \cdot g_1 \quad (1b)$$

$$\rho \frac{\partial^2 B_2}{\partial t^2} + \rho \omega_{c,2}^2 B_2 = \frac{\partial \tau_2}{\partial z} + \rho \cdot g_2 \quad (1c)$$

The fields $A(t, z)$, $B_1(t, z)$ and $B_2(t, z)$ are certain coupled mode amplitudes that describe mechanical wave propagation and vibrations.

In Equations (1), the stresses σ and τ are **equivalent** normal stress and **equivalent** shear stresses.

The additional terms $\rho \cdot f(t, z)$, $\rho \cdot g_1(t, z)$, $\rho \cdot g_2(t, z)$ represent distributed forces that may excite the corresponding propagation mode. For example: magneto-strictive, electro-strictive or thermo-elastic forces, amongst others. The effect of forces due to transducers or other excitation devices located at the ends of the rods or tubes appear in the boundary conditions, as usual. The terms $\rho \cdot \omega_c^2 \cdot B$ look like a kind of elastic restoring forces associated with the displacements B , and they are added to the spatial derivatives of the "equivalent stresses" σ , τ and to the volume forces $\rho \cdot f$ and $\rho \cdot g$ in the above coupled set of non-homogeneous partial differential equations.

Equations (1) are already in the form often used in the study of mode coupling in engineering.

In linear rods of uniform transverse sections, the **equivalent** normal stress σ and the **equivalent** shear stresses τ are given by the relations:

$$\sigma = \hat{E} \cdot \left(\frac{\partial A}{\partial z} - K_1 \cdot \frac{\partial B_1}{\partial z} - K_2 \cdot \frac{\partial B_2}{\partial z} \right) \quad (2a)$$

$$\tau_1 = \hat{G} \cdot \left(\frac{\partial B_1}{\partial z} - K_1 \cdot \frac{\partial A}{\partial z} \right) \quad (2b)$$

$$\tau_2 = \hat{G} \cdot \left(\frac{\partial B_2}{\partial z} - K_2 \cdot \frac{\partial A}{\partial z} \right) \quad (2c)$$

The symbols \hat{E} and \hat{G} represent certain operators that will be detailed below.

Here K_1 , K_2 are phenomenological coupling constants. They will be suitably restricted later. If $K_1 = K_2 = 0$, the coupling disappears and $A(t, z)$ becomes the amplitude of the pure extensional mode, while $B_1(t, z)$ and $B_2(t, z)$ becomes the amplitudes of suitable pure shear modes. In general, when both $K_\alpha \neq 0$ we obtain three equations that couple the the **equivalent** normal stress σ and the **equivalent** shear stresses τ with the amplitudes $A(t, z)$, $B_\alpha(t, z)$

The linear elastic case is obtained from Equations (1) and (2) introducing the Young modulus $\hat{E} = E_0 \cdot \hat{I}$ and shear modulus $\hat{G} = G_0 \cdot \hat{I}$ (being \hat{I} the identity operator). Then, if the relations $v_E = \sqrt{E_0/\rho}$ for the extensional velocity and $v_T = \sqrt{G_0/\rho}$ for the shear wave velocity in a linear elastic solid are taken into account, it is possible to derive from Equations (1) and (2) the following coupled set of wave equations:

$$\frac{\partial^2 A}{\partial z^2} - \frac{1}{v_E^2} \frac{\partial^2 A}{\partial t^2} = K_1 \frac{\partial^2 B_1}{\partial z^2} + K_2 \frac{\partial^2 B_2}{\partial z^2} \quad (3a)$$

$$\frac{\partial^2 B_1}{\partial z^2} - \frac{1}{v_T^2} \frac{\partial^2 B_1}{\partial t^2} - \frac{\omega_{c1}^2}{v_T^2} B_1 = K_1 \frac{\partial^2 A}{\partial z^2} \quad (3b)$$

$$\frac{\partial^2 B_2}{\partial z^2} - \frac{1}{v_T^2} \frac{\partial^2 B_2}{\partial t^2} - \frac{\omega_{c2}^2}{v_T^2} B_2 = K_2 \frac{\partial^2 A}{\partial z^2} \quad (3c)$$

Let us search new emerging modes of propagation substituting the following **ansatz** in Equations (3): $A(t, z) = C(k) \cdot e^{j(\omega t - kz)}$ (4a)

$$B_1(t, z) = D_1(k) \cdot e^{j(\omega t - kz)} \quad (4b)$$

$$B_2(t, z) = D_2(k) \cdot e^{j(\omega t - kz)} \quad (4c)$$

This gives a system of linear homogeneous equations for the emergent mode amplitudes: $C(k)$ $D_1(k)$ $D_2(k)$

These homogeneous equations have non- zero solutions if and only if the following **dispersion equation** is verified:

$$\left(\frac{\omega^2}{v_E^2} - k^2 \right) \cdot \Delta_1(k) \cdot \Delta_2(k) = k^4 (K_1^2 \cdot \Delta_2(k) + K_2^2 \cdot \Delta_1(k)) \quad (5)$$

By definition: $\Delta_1(k) = \frac{(\omega^2 - \omega_{c1}^2)}{v_T^2} - k^2$ (6a) $\Delta_2(k) = \frac{(\omega^2 - \omega_{c2}^2)}{v_T^2} - k^2$ (6b)

When both coupling constants are different from zero, this dispersion equation always has three real, positive and non-intersecting solutions $\omega = \omega_\mu(k)$ defined for every real k with $\mu = l$ (lower), m (middle), u (upper). If k approaches zero, the coupling of the modes disappears. The lower branch $\omega = \omega_l(k)$ approaches the dispersion equation of the uncoupled extensional mode $\omega = v_E \cdot k$. The middle one $\omega = \omega_m(k)$ approaches the dispersion equation of the uncoupled first shear mode and the upper branch $\omega = \omega_u(k)$ approaches the dispersion equation of the second shear mode.

Equations (1) and (2) can be applied in the **linear hereditary** case substituting the operators \hat{E} and \hat{G} by the corresponding **linear operators** $\hat{E} = E_0 (\hat{I} - \hat{L})$ and

$\hat{G} = G_0(\hat{I} - \hat{M})$. The integral operators \hat{L} and \hat{M} act in the time domain according to Boltzmann's principle of superposition (Rabotnov, 1980, chapters 1 and 2).

If $L(t)$ and $M(t)$ are the kernels of the operators \hat{L} and \hat{M} respectively, if $h(t, z)$ is a field, then by definition:

$$\hat{L}[h] = \int_{-\infty}^t L(t-u)h(u, z)du \quad (7a)$$

$$\hat{M}[h] = \int_{-\infty}^t M(t-u)h(u, z)du \quad (7b)$$

In this case it is convenient to apply the method of Finite Fourier Transforms (Zauderer, 1989). All the fields are represented as linear combinations of a complete set of known orthonormal eigenfunctions weighted by time unknown dependent

amplitudes. In our case the eigenfunctions $\varphi_n(z)$ verify the equation $-\frac{d^2\varphi_n}{dz^2} = k_n^2 \cdot \varphi_n$

with suitably chosen homogeneous boundary conditions at the beginning $z = 0$ and the end $z = b$ of the rod, so that the given stress or displacement at the boundary of the rod or tube can be taken into account in the dynamic equations for the amplitudes. If $h(t, z)$ represents any field (displacements, strains, stresses, or volume force densities) we

define its projections onto the eigenfunctions: $h_n(t) = \int_0^b h(t, z) \cdot \varphi_n(z) dz$ Then, the field

can be thus decomposed: $h(t, z) = \sum_n h_n(t) \cdot \varphi_n(z)$ (Further developments of the linear hereditary case can be found in Suárez-Antola, 2007)

3. RESULTS FOR LOW AND HIGH FREQUENCIES

3.1- Mode amplitudes, phase and group velocities in the linear elastic case for two coupled modes

To study longitudinal vibrations, either forced or free, and low frequency wave propagation, or at the other extreme, very high frequency wave propagation, a lower and an upper branch could be enough. So, let us begin by coupling only two modes of propagation: the extensional mode with dispersion equation $\omega = v_E \cdot k$, and one of the

shear modes with dispersion equation: $\omega^2 = \omega_c^2 + v_T^2 \cdot k^2$

So, we put: $K_2 = 0 \quad K_1 = K \quad B_1(t, z) = B(t, z) \quad D_1(k) = D(k)$

Then the dispersion equation reduces to (now $\Delta(k) = \frac{(\omega^2 - \omega_c^2)}{v_T^2} - k^2$):

$$\left(\frac{\omega^2}{v_E^2} - k^2 \right) \cdot \Delta(k) = k^4 K^2 \quad (8)$$

The system of linear equations for the mode amplitudes $C(k) \ D(k)$ reduces to:

$$\left(\frac{\omega^2}{v_E^2} - k^2 \right) C(k) = -k^2 (K \cdot D(k)) \quad (9a)$$

$$\Delta(k)D(k) = -k^2 KC(k) \quad (9b)$$

When the coupling constant is different from zero, this dispersion equation always has two real, positive and non-intersecting solutions $\omega = \omega_\mu(k)$ defined for every real k , with $\mu = l$ (lower), u (upper). If k **approaches zero**, the lower branch $\omega = \omega_l(k)$ approaches the dispersion equation of the uncoupled extensional mode $\omega = v_E \cdot k$. The upper branch $\omega = \omega_u(k)$ approaches the dispersion equation of the shear mode, also when k tends to zero. But when k **tends to infinity**, the lower branch is asymptotic to $\omega = v_S \cdot k$, and if we select K properly, the upper branch will be asymptotic to $\omega = v_L \cdot k$. The asymptotic phase velocities v_S , v_L can be found from equation (6). If $v_a = \lim_{k \rightarrow \infty} \omega/k$ for $k \rightarrow \infty$, taking the limit in the dispersion equation we obtain:

$$\left(\frac{v_a^2}{v_T^2} - 1 \right) \left(\frac{v_a^2}{v_E^2} - 1 \right) = K^2 \quad (10)$$

If we establish that $v_a = v_L$ must be a positive root of Equation (8), then we must choose

$$K^2 = \left(\frac{v_L^2}{v_T^2} - 1 \right) \left(\frac{v_L^2}{v_E^2} - 1 \right) \quad (11)$$

This coupling constant is a function of Poisson's modulus only.

Taking into account the well-known relations between Young's and Poisson's moduli, from one side, and v_L , v_T and v_E from the other, it follows from Equation (11) that:

$$K = \frac{\nu}{1-2\nu} \cdot \sqrt{\frac{2}{1+\nu}}$$

Most solids have values of ν between 0.25 and 0.30. So K increases when ν increases and verifies: $0.632 < K < 0.930$

If $v_a = v_L$ the second positive root of Equation (5) is $v_a = v_S$ and it verifies

$$v_S^2 = v_E^2 + v_T^2 - v_L^2 \quad (12)$$

This is the abovementioned asymptotic phase velocity of the lower branch. As will be pointed in the discussion, it should be equal to the velocity of Rayleigh waves in the material.

If $\omega = \omega_\mu(k)$ ($\mu = l, u$) represents the two branches of the dispersion Equation (8), and if we introduce the phase velocity: $v_{f,\mu} = \omega_\mu(k)/k$ then for each mode of propagation the following relation is obtained between $C(k)$ and $D(k)$

$$\frac{D_\mu(k)}{C_\mu(k)} = -\frac{1}{K} \left[\left(\frac{v_{f,\mu}}{v_E} \right)^2 - 1 \right] \quad (13)$$

Note that $C_\mu(k)$ and $D_\mu(k)$ always remain bounded. In order to take into due account Poisson's effect (axial elongation (compression) appears together with lateral contraction (dilatation)), K must be considered to be positive. Thus if $v_{f,\mu} > v_E$, and if $C_\mu(k)$ and $D_\mu(k)$ are taken as real functions, then they have opposite signs. If they are complex functions of k , their arguments are equal or differ in π , according to the sign of the right hand member of Equation (13). For $\mu = l$, the lower extensional-surface

mode, when k approaches to zero (long wavelengths) the phase velocity $v_{f,l}$ approaches to v_E , so that $D_l(k)$ approaches to zero. For $\mu = u$, the upper shear-dilatational mode

$D_u(k)/C_u(k)$ approaches to $-\sqrt{\left(\frac{v_L^2}{v_E^2}\right)-1}/\left(\frac{v_L^2}{v_E^2}\right)-1$ when k tends to infinity (short wavelengths). To obtain this last result we must substitute K in Eq. (13) by its expression as a function of v_L , v_T and v_E given by Equation (11).

If we define non-dimensional variables $x = R\omega/v_L$ and $y = k.R$, the dispersion equation (Equation (8)) can be rewritten as follows, with $\omega_C = \alpha_T v_T / R$:

$$\left(\frac{v_L^2}{v_E^2} x^2 - y^2\right) \cdot \left(\frac{v_L^2}{v_T^2} x^2 - \alpha_T^2\right) = K^2 y^4 \quad (14)$$

From Equation (14) we can obtain x as a function of y (that is, ω as a function of k) or y as a function of x (that is, k as a function of ω). We are going to solve ω as a function of k , for purpose of comparison with the other approaches to the dispersion relation. Thus, we obtain two branches, $f_l(y)$ and $f_u(y)$ being

$$f_{l(u)}(y) = \sqrt{\frac{1}{2} \left[\alpha y^2 + \beta_{(+)} \sqrt{(\beta + \gamma y^2)^2 + \delta y^4} \right]} \quad (15)$$

Here: $\alpha = \left(\frac{v_E}{v_L}\right)^2 + \left(\frac{v_T}{v_L}\right)^2$ $\beta = \alpha_T^2 \left(\frac{v_T}{v_L}\right)^2$ $\gamma = \left(\frac{v_T}{v_L}\right)^2 - \left(\frac{v_E}{v_L}\right)^2$ $\delta = 4K^2 \left(\frac{v_E}{v_L}\right)^2 \left(\frac{v_T}{v_L}\right)^2$

Figure 1 shows the two branches of the simplified dispersion equation, calculated from Equation (15), with $\alpha_T = 3.83$ and for the case of a steel bar: $v_T = 3230$ m/s, $v_E = 5192$ m/s and $v_L = 5900$ m/s.

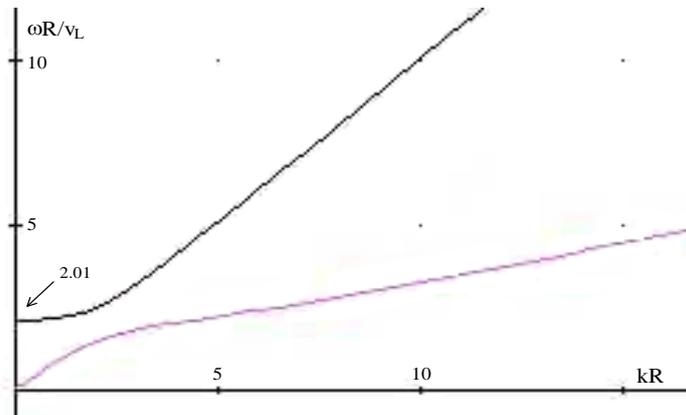


Figure 1. The dispersion relations: upper and lower branch.

Figure 2 shows the dimensionless group velocity $v_g/v_L = \left(\frac{d}{dy}\right)f(y)$ is a function of y for each branch of the dispersion equation, where $f(y)$ is $f_l(y)$ or $f_u(y)$. As $y = kR$ we can obtain from these curves not only how the group velocity depends of the wave-number k , but also how it depends of the bar radius R .

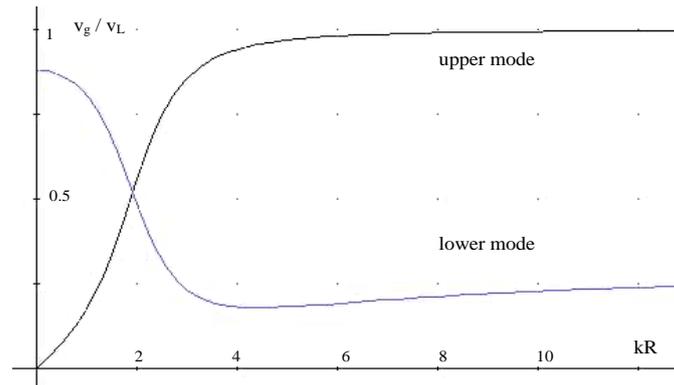


Figure 2. Upper and lower mode: group velocities as functions of the product of the radius and wave-number.

The curve that gives the group velocity as a function of $k.R$ for the **extensional-surface mode** present a minimum exactly as the corresponding curve found by a detailed numerical analysis of the solutions of the Pochhammer-Chree's exact dispersion equation. The other curve, that gives the group velocity as a function of $k.R$ for the **shear-dilatational mode**, begins from zero and grows towards a horizontal asymptote that corresponds to $v_g = v_L$.

3.2- Vibration and waves in the elastic case with two coupled modes of propagation

In principle we could consider three idealized situations:

- First we have a wave guide that may be considered infinite in both directions. Then, for $t = 0$ we assume that we know the spatial pattern of mode amplitudes of the **extensional-surface** mode $A(0, z)$, and the **shear-dilatational** mode $B(t, z)$ and after that we want to follow the propagation of the elastic disturbance. The localized initial disturbance (a wave-packet) can be expressed as a Fourier integral using the wave-number k . Then, to follow the propagation of the pulse we need ω as a function of k .
- Second we have a half infinite waveguide, with an emitting transducer located at $z = 0$. Now we know the fields as a function of t , and we can express them as Fourier integrals using the frequency ω . To follow the propagation of the disturbance thus generated, we need k as a function of ω .
- Third situation, we have a finite rod vibrating with given boundary conditions at both ends, and we obtain a numerable infinity of possible k values.

In our case, the second and third situations are the most interesting.

Almost all the numerical calculations done for plates, rods and other types of solid waveguides give ω as a function of k , and then give both phase and group velocities as functions of k . This allows us to calculate the frequencies of rod vibration for each possible wave-number. For **free vibrations**, the fields $A(t, z)$ and $B(t, z)$ are represented by a linear combination (series) of standing waves for the allowed wave-numbers k_n , with the frequencies of the lower and upper modes given by Eq.(12) as well defined functions of k_n . The corresponding mode amplitudes are determined from the initial conditions and the restriction imposed by Equation (13).

On the other side, for each mode of propagation the relation between ω and k is given by a strictly monotonic function (see Fig.1). So, instead of solving Equation (10) to find ω as a function of k it is possible to solve it to find k as a function of ω :

$$2.(1 - K^2)k_\mu^2(\omega) = k_E^2(\omega) + k_T^2(\omega) + \delta_\mu \cdot \sqrt{(k_E^2(\omega) + k_T^2(\omega))^2 - 4.(1 - K^2)k_E^2(\omega)k_T^2(\omega)} \quad (16)$$

($\delta_\mu = +1$ for the lower mode $\mu = l$, and $\delta_\mu = -1$ for the upper mode $\mu = u$).

Here:

$$k_E^2(\omega) = \frac{\omega^2}{v_E^2} \quad k_T^2 = \frac{\omega^2 - \omega_c^2}{v_T^2}$$

We can calculate $C_\mu(\omega)$ and $D_\mu(\omega)$ the same as before, now putting k as a function of ω . Then we can apply these last relations to the half infinite waveguide mentioned before, adding the contributions of the lower and upper modes to construct a wavepacket.

In terms of the frequencies, the wave fields of the coupled modes are given by the following equations:

$$A(t, z) = \int_{-\infty}^{+\infty} C_l(\omega) e^{i\phi_{l,C}(\omega)} \cdot e^{i(\omega t - z k_l(\omega))} d\omega + \int_{-\infty}^{+\infty} C_u(\omega) e^{i\phi_{u,C}(\omega)} \cdot e^{i[\omega t - z k_u(\omega)]} d\omega \quad (17a)$$

$$B(t, z) = \int_{-\infty}^{+\infty} D_l(\omega) e^{i\phi_{l,D}(\omega)} \cdot e^{i(\omega t - z k_l(\omega))} d\omega + \int_{-\infty}^{+\infty} D_u(\omega) e^{i\phi_{u,D}(\omega)} \cdot e^{i[\omega t - z k_u(\omega)]} d\omega \quad (17b)$$

In this case both $C_\mu(\omega)$ and $D_\mu(\omega)$ for $\mu = l, u$ are positive. The arguments $\phi_{\mu,C}$ and $\phi_{\mu,D}$ are either equal or differ in π by the same reasons explained before, in relation with Equation (13).

When t is big enough, the method of stationary phase (Skudrzyk, 1971) can be applied to the evaluation of the integrals (17). For given values of (t, z) the main contribution to the integral comes from the frequencies $\omega = \omega_e(t, z)$ that verify:

$$\frac{\partial k_\mu(\omega_e)}{\partial \omega} = \frac{t}{z} \quad \mu = l, u \quad (18)$$

If (18) does not have real roots, neither for $\mu = l$ nor for $\mu = u$, both mode amplitudes A and B are negligible.

Applying the method of the stationary phase, the scalar field (17a) can be approximated by:

$$A(t, z) \approx \frac{2.C_l(\omega_{e,l})}{\left[\frac{1}{2\pi} \left| \frac{\partial^2 k_l(\omega_{e,l})}{\partial \omega^2} \right| \cdot z \right]^{\frac{1}{2}}} \cdot \cos \left(\omega_{e,l} t - k_l(\omega_{e,l}) z + \phi_l(\omega_{e,l}) + s_l \cdot \frac{\pi}{4} \right) + \frac{2.C_u(\omega_{e,u})}{\left[\frac{1}{2\pi} \left| \frac{\partial^2 k_u(\omega_{e,u})}{\partial \omega^2} \right| \cdot z \right]^{\frac{1}{2}}} \cdot \cos \left(\omega_{e,u} t - k_u(\omega_{e,u}) z + \phi_u(\omega_{e,u}) + s_u \cdot \frac{\pi}{4} \right) \quad (19)$$

Here s_μ is the sign of $\frac{\partial^2 k_\mu(\omega_e)}{\partial \omega^2} \neq 0$. For the other field, (17b), we have the same expression but with D_μ instead of C_μ . Formula (19) is a local approximation by a harmonic wave of frequency ω_e and wave number $k(\omega_e)$.

But when $\frac{z}{t}$ varies, ω_e changes as well (according to formula (18)), so that we obtain a wave modulated in amplitude, frequency and phase. When $\frac{\partial^2 k_\mu(\omega_e)}{\partial \omega^2} \approx 0$, the asymptotic method of the stationary phase fails, and another approach must be applied, like the Airy phase approximation method (Skudrzyk, 1971; Suárez-Antola, 1998).

The upper branch for high frequencies ($k.R$ much bigger than 1) may be approximated

by: $\omega^2 = \omega_{MS}^2 + v_L^2 . k^2$ Here $\omega_{MS} = \frac{\gamma . v_L}{R}$, (γ is a dimensionless parameter) is the Mc-

Skimin frequency (Suárez-Antola, 1998). For this asymptotic dispersion relation the local frequency of the stationary phase approximation (Equation (18)) of a propagating

wave packet is: $\omega_e(t, z) = \frac{\omega_{MS}}{\sqrt{1 - \left(\frac{z}{v_L . t}\right)^2}}$ (We have a single real root if z is less than

$v_L . t$, and no root and no wave at all if it is greater). Let $\omega_{e,u}$ be the biggest frequency whose amplitude is over the detection threshold of the measurement system. Then from the equation for $\omega_e(t, z)$ it follows that for a certain position z of the receiving transducer, the first signal detected would be registered in an instant t such that:

$\frac{(z/t)}{v_L} = \sqrt{1 - \frac{\omega_{MS}^2}{\omega_{e,u}^2}}$ This would give us the **apparent dilatational pulse velocity**,

measured with a propagating wave-packet. Usually $\omega_{e,u}$ is greater than the carrier frequency ω_0 of the pulse.

4. CONCLUSIONS

4.1- The analytical model of wave propagation and vibrations of linear elastic solids described in the present work may be considered as an improvement and a significant generalization of the old theory of Giebe and Blechschmidt (Kolsky, 1963; pp. 97-98).

The present model retains certain advantages of this theory (description of the longitudinal oscillations using a few modes, very good behaviour at relatively low frequencies, and applicability to bars and tubes of any cross section (after a suitable selection of the cut-off frequencies of the basic shear modes)) and avoids its main pitfalls (death interval of frequency for rods with circular cross-section, horizontal asymptote in the ω - k plane for the lower mode, and shear wave velocity as asymptotic phase velocity for the upper mode). For a detailed test of the results obtained, new experiments and digital simulations should be done.

4.2-As the proposed ROM can be applied to linear hereditary materials, it allows us to take into account friction processes and could be used as an intermediate step towards a

generalization of the concept of region of influence of defects proposed by the author (Suárez-Antola, 2005).

4.3- The model has to be completed in order to obtain a simple specification of the distribution of elastic energy between the different modes of propagation in the high frequency case. For low frequency vibrations of rods and tubes this can be considered as already done through the volume forces and the boundary conditions that must be applied to Equations (1) and (2). Then, with this addition and with the use of asymptotic methods, it should be possible to predict the propagation of longitudinal pulses in different solid waveguides and for different inputs.

4.4- The full calculation for the amplitudes, phase, and group velocities with three modes of propagation remains to be done. In the case of the model with three modes, we need another relation between the phenomenological constants K_1 and K_2 . The results should be tested by suitable designed experiments and digital simulations.

REFERENCES

- Auld, W., *Acoustic fields and waves in solids*, Vol.2, New York: Wiley; 1973.
- Achenbach, J., *Wave propagation in elastic solids*, Amsterdam: North-Holland; 1973.
- Kolsky, H., *Stress waves in solids*, New York: Dover; 1963.
- Mc Skimin, H., Propagation of longitudinal waves and shear waves in cylindrical rods at high frequencies. *J. Acoustical Soc. of America* 1956; 28 (3):484-494.
- Nadeau, G., *Theory of elasticity*, New York: Holt, Rinehart and Winston; 1964.
- Pierce, J., Coupling of modes of propagation, *Journal of Applied Physics* 1954, 25:179-183.
- Rabotnov, A., *Elements of hereditary solid mechanics*, Moscow: MIR; 1980
- Skudrzyk, E., *The Foundations of Acoustics*, New York: Springer-Verlag; 1971.
- Suárez-Ántola, R., La influencia de las dimensiones del cuerpo ensayado sobre la velocidad de propagación de los pulsos ultrasónicos longitudinales, *Proceedings of the III Congress on Non-Destructive Testing for Latin-America and the Caribbean* 1990; Caracas, Venezuela.
- Suárez-Ántola, R., 1998, Dispersión de ondas ultrasónicas longitudinales en barras, *First Iberoamerican Workshop on Ultrasounds* 1998, Cartagena de Indias, Colombia.
- Suárez-Ántola, R. and Suárez-Bagnasco, The influence of reinforcement steel bar on the apparent longitudinal pulse velocity in concrete: a simple mathematical model, *Proceedings of the XV Brazilian Congress of Mechanical Engineering* 1999, ABCM, S.P. Brazil.
- Suárez-Ántola, R., The region of influence of significant defects and the mechanical vibrations of linear elastic solids, *Proceedings of the XI DINAME* 2005, ABCM, S.P. Brazil.
- R. Suárez-Ántola, Contributions to the theory of longitudinal vibrations and wave propagation in rods and tubes: I. A mathematical model for linear elastic and hereditary elastic solids, *Proceedings of the XII DINAME* 2007, ABCM, Ilhabela, SP, Brazil.
- R. Suárez-Ántola, The meaning of transit times of ultrasonic pulses in NDT of concrete, *The e-Journal & Database of Nondestructive Testing* 2007, 12(11).
- Zauderer, E., *Partial differential equations of applied mathematics*, New York: Wiley; 2011.

ESTUDIO E IMPLEMENTACIÓN DE CUADRO DE CLASIFICACIÓN CUANTITATIVO PARA ENSAYOS DE EMISIÓN ACÚSTICA EN FONDOS DE TANQUES EN ARGENTINA

Tellería, Gonzalo.^a, Tellería, Juan Manuel.^b, Castillo Canache, Argenis.^c

^a Gerencia de Integridad - GTI Internacional, ARGENTINA

^b Gerencia de END - AE - GTI Internacional, ARGENTINA

^c Jefatura de Inspecciones - GTI Internacional, VENEZUELA

e-mail: gtelleria@gti-internacional.com

RESUMEN

A pesar todos los avances en los últimos tiempos en materia de innovación y desarrollo de nuevas tecnologías en términos de instrumentación, detección, adquisición y procesamiento de datos en el campo de la EA, no se cuenta con un criterio de aceptación estandarizado para la clasificación del estado del fondo de los tanques, de acuerdo con sus Parámetros de EA. En nuestro país, al no poseer ninguna Norma Nacional para la realización, análisis de resultados y Monitoreo de Corrosión del fondo del tanque, es que utiliza la Norma Europea EN15856 y cada ejecutante desarrolla su Criterio de aceptación de forma cualitativa para la clasificación de los mismos. Ante la necesidad de contar con una herramienta que permita realizar el Ensayo y la respectiva clasificación de forma estandarizada que considere y enmarque los principales Parámetros de EA como Amplitud, Hits, Agrupamientos localizados, Energía y Tiempo de subida, de forma CUANTITATIVA que asegure la repetitividad y representatividad de la realización del test es que se lleva a cabo el estudio, análisis, propuesta e implementación de un CUADRO DE CLASIFICACIÓN CUANTITATIVO como CRITERIO DE ACEPTACIÓN, basándonos en los resultados obtenidos de estudios en tanques en distintos países de Latinoamérica como Perú, Bolivia, Argentina y Venezuela, junto con análisis de métodos cualitativos europeos, el cual será incluido en la nueva NORMA IRAM 725, Emisión Acústica para la detección de la corrosión en un recipiente metálico lleno de líquido que el Subcomité de Emisión Acústica del IRAM, estará emitiendo y aprobando para su uso durante 2019.

Palabras Clave: EA, Parámetros, Criterio de Aceptación, Cuantitativo

1. INTRODUCCIÓN

La inspección de un Tanque de Almacenamiento es una tarea compleja debido a que fundamentalmente se debe llevar a cabo dos tipos de inspecciones: una Inspección Externa y una Inspección Interna.

La Inspección Externa generalmente es llevada a cabo con el tanque en servicio, pero la Inspección interna es la forma que tenemos de manera directa de verificar a través de Ensayos No destructivos el Estado de Integridad del fondo, si presenta corrosión del lado producto, del lado suelo o hay presencia de fugas activas en el mismo.

Para la Inspección Interna es necesario sacar de servicio el tanque, proceder a su apertura y limpieza interior, donde muchas veces es necesario la apertura de una Puerta de Obra para el

ingreso de maquinaria y equipos de limpieza, descontaminación, traslado de residuos, conllevando a un elevadísimo costo y tiempo de fuera de servicio del tanque.

La extensión de la corrosión del lado del producto se puede detectar utilizando técnicas de inspección estándar durante una inspección interna, pero determinar la naturaleza y el alcance de la corrosión del lado del suelo es más difícil. En muchos casos los diseños y construcción de los tanques poseen un monitoreo de fugas a través de las Placas de fondo del tanque, que permite la verificación directa de la presencia de la misma, pero como método preventivo ya es muy tarde porque el tanque ya se encuentra en fuga.

La evaluación de tanques bajo condiciones controladas con Emisión Acústica, proporciona información de la situación de integridad del fondo contribuyendo en la creación de cronogramas con niveles de prioridades para la actividad de mantenimiento de tanques. Podemos identificar áreas probables de fugas antes de que se presente un fallo y áreas con niveles de corrosión que permiten anticiparse a la ocurrencia de la fuga.

La aplicación de Ensayos No destructivos de Emisión Acústica, nos lleva a la aplicación de estándares reconocidos Nacionales e Internacionales.

La Norma más utilizada en la realización de los Ensayos de Emisión acústica en Tanques de almacenamiento es la Norma Europea UNE -EN-15856-Principios generales del ensayo por emisión acústica para la detección de la corrosión en un recipiente metálico lleno de líquido, y bajo los criterios de la misma cada ejecutante desarrolla su CRITERIO DE ACEPTACIÓN de forma cualitativa o cuantitativa para la clasificación de los mismos.

Nuestro país, no posee Norma Nacional para la realización, análisis de resultados y Monitoreo de Corrosión del fondo del tanque, recién se ha desarrollado y se encuentra en proceso de emisión la Norma IRAM 725 - Emisión Acústica para la detección de la corrosión en un recipiente metálico lleno de líquido que el Subcomité de Emisión Acústica del IRAM.

A nuestra perspectiva es necesario contar con una clasificación que permita realizar el Ensayo y la respectiva clasificación de forma estandarizada que considere y enmarque los principales Parámetros de EA como Amplitud, Hits, Agrupamientos localizados, Energía y Tiempo de subida, de forma CUANTITATIVA que asegure la repetitividad y representatividad de la realización del test.

Basado en estos principios lleva adelante el estudio, análisis, propuesta e implementación de un Cuadro de Clasificación Cuantitativo como CRITERIO DE ACEPTACIÓN, basándonos en los resultados obtenidos de estudios en tanques en distintos países de Latinoamérica.

2. DESCRIPCIÓN DEL EQUIPO DE EMISIÓN ACÚSTICA

Los ensayos fueron realizados con sistema de medición de emisiones acústicas digital multicanal, de la marca VALLEN modelo AMSY-6. El equipo posee canales de medición con una configuración en paralelo, donde, cada canal posee un sensor de Emisión Acústica (AE), un preamplificador y un procesador de señales acústicas de doble canal o ASIP-2 y el software frontal que se ejecuta de forma externa en una PC. Cada canal combina una sección de medición analógica y una unidad de procesamiento de señal digital. Las características de AE, como el tiempo del primer cruce de umbral (tiempo de llegada), el tiempo de subida, la duración, la amplitud de pico, la energía y los conteos, se extraen mediante el ASIP-2. En paralelo a la obtención de las características antes mencionadas, es posible grabar la forma de la onda en forma completa en el modulo opcional de registro de transitorios.

AMSY-6 es un sistema de medición AE que cumple con la norma EN13477-1, "Pruebas no destructivas - Pruebas de emisión acústica - Caracterización del equipo - Parte 1: Descripción del equipo" y que se puede verificar según la norma EN 13477-2, "Pruebas no destructivas - Pruebas de emisiones acústicas - Caracterización de equipos - Parte 2: Verificación de las características operativas".

2.1 Sensores:

El sensor de emisión acústica se encarga de convertir el desplazamiento de superficie en una señal eléctrica. Para los ensayos fueron utilizados sensores VALLEN modelo VS-150 – RIC, estos son

sensores piezoeléctricos de AE con preamplificadores integrados. Su respuesta de frecuencia se caracteriza por exhibir un pico de resonancia a 150kHz. Es adecuado para casi todas las aplicaciones de AE.

2.2 Datos que proporciona el equipo:

El AMSY-6 proporciona 4 tipos de datos de medición:

- 1. Datos de hit:** datos que se generan cuando la señal AE supera el umbral.
- 2. Datos de estado:** datos que se generan en intervalos de tiempo regulares.
- 3. Datos paramétricos:** datos de sensores paramétricos externos que se miden a intervalos de tiempo regulares. Los datos paramétricos se almacenan con cada golpe y en intervalos de tiempo especificados por el usuario.
- 4. Datos de forma de onda:** señal muestreada del sensor AE.

El software de front-end del sistema se ejecuta en una PC y controla la adquisición de datos, el almacenamiento de datos y es capaz de analizar los datos en línea y fuera de línea.

3. DESCRIPCIÓN DEL ENSAYO:

Para realizar el ensayo de emisión acústica en forma correcta tal que, permita la adquisición de datos representativos, confiables y válidos, para la detección de corrosión en tanques llenos de líquido es necesario cumplir con tres (3) etapas claramente identificables como son: **Preparación y condiciones previas al ensayo, Calibración y ajustes en campo y Tiempo de prueba y verificación final.** A continuación, se describen estas etapas.

3.1 Preparación y condiciones previas al ensayo:

1. Se requiere realizar el llenado del tanque a máxima altura, procurando no exceder el límite de altura en el caso de tanques con techo flotante.
2. Realizar el cierre completo de válvulas de las líneas o sistema de entrada y salida de fluido o líneas de recirculación.
3. Se debe dejar en reposo el tanque por al menos 24 horas.
4. En caso de que, por razones operacionales, de proceso o por el tipo de fluido que maneje el tanque (Azufre, crudo, fluidos viscosos, etc.) posea un serpentín interno o sistema de calefacción, este debe ser sacado de servicio al momento de realizar el ensayo, para evitar posibles fuentes de emisión acústicas que no son de interés para el estudio, que pudieran enmascarar indicaciones de o restarle sensibilidad a la prueba.
5. Se debe coordinar y planificar el ensayo para una fecha que las probabilidades de contar con presencia de lluvias, fuertes vientos o cualquier otra inestabilidad atmosférica no sea tan elevada. Estos factores afectan directamente al ensayo generando fuentes de ruidos.
6. En caso de que exista acumulación de barro o agua en el fondo del tanque, se debe determinar la altura de esta capa, para determinar que tanto afecta al ensayo en términos de la atenuación de las ondas que se pueda presentar.

3.2 Calibración y ajustes en campo:

1. Realizar inspección visual externa en el perímetro del tanque, para evaluar su condición externa y determinar si pudiera existir una fuente cercana de ruido que pueda afectar el desarrollo del ensayo (vibraciones de bombas, vegetación adyacente al tanque, etc). De encontrarla, deben tomarse acciones para su mitigación.
2. Realizar la verificación dimensional del tanque.
3. Determinar la cantidad de sensores a utilizar a partir del perímetro del tanque, tomando como máxima distancia permisible entre sensores 15 metros.

4. Antes de colocar los sensores en la superficie del tanque, realizar una prueba de adquisición de datos de ruido de fondo durante 5 minutos, para verificar si los sensores funcionan correctamente.
5. Ubicar los sensores a la misma distancia en la superficie del tanque a 1 metro del suelo.
6. Ubicar los sensores guardianes en línea recta sobre el anillo de sensores de adquisición a una distancia de al menos 1 metro, estos se encargarán de filtrar todos los ruidos y emisiones acústicas que se puedan generar fuera del área de interés. De ser posible colocarlos entre 4 y 6 metros del anillo de sensores.
7. Una vez posicionado todos los sensores, se verifica nuevamente el ruido de fondo durante 5 minutos. En este tiempo se verifica si los sensores funcionan correctamente, si existe alguno con mal acople o si existen desviaciones en los niveles de ruidos tal que puedan dar condiciones de parada o invaliden el ensayo.
8. El ruido de fondo no debe exceder los 5 μ V. De detectarse niveles de ruidos superiores a este valor se debe intentar determinar de donde se origina y mitigarlo. De no ser posible, debe registrarse con claridad esta condición en el reporte, pues es posible que no sea posible detectar corrosión con emisiones acústicas de baja intensidad.
9. Realizar la calibración del sistema usando un simulador de emisión acústica Hsu - Nielsen para cada sensor, efectuando cuatro (4) fracturas de minas a 5 mm de distancia de cada sensor, verificando en el Software que las amplitudes obtenidas sean mayores de 90 dB y constatando que el procesador de ubicación sea capaz de detectar y ubicar correctamente la fuente de emisión acústica. Igualmente, se verifica que no exista una diferencia mayor a ± 3 dB de la media con cada uno de los sensores.
10. Realizar una última verificación de los sensores, utilizándolos en modo pulsador. Esto se realiza directamente desde el Ordenador al cual está conectado el equipo.

3.3 Tiempo de Prueba y Verificación Final:

Luego de verificado el correcto funcionamiento de los sensores, el equipo y el software, se procede a adquirir los datos del tiempo de prueba, en donde se debe considerar lo siguiente:

1. Garantizar al menos 60 minutos de adquisición de datos, en los cuales deben quedar registrados cualquier eventualidad que pudiera presentarse (ráfagas de viento, gotas de llovizna intermitente, golpes con herramientas mecánicas, etc) generando que los valores y niveles de ruidos se incrementen puntualmente. De ser necesario, el operador del ensayo puede extender el tiempo de prueba para descartar cualquier duda.
2. Durante la prueba se debe verificar en todo momento el ruido de fondo, comprobando que no existan condiciones de interrupción, parada o se saturen los canales. De ser así, el operador puede variar el umbral de adquisición, sin embargo, esto debe quedar registrado y tomarse consideraciones para extender el tiempo de prueba.
3. Una vez cumplido el período o tiempo de, se debe verificar nuevamente la calibración de los sensores con el método de simulación Hsu-Nielsen y posteriormente realizar la verificación final de los sensores en modo pulsación. Al igual que la calibración previa al ensayo, en este punto se verifica que no exista una diferencia mayor a ± 3 dB de la media con cada uno de los sensores.
4. Desmontar los sensores, los cables y el equipo.

4. ANÁLISIS DE LOS DATOS

Las indicaciones detectadas y la evaluación de los Agrupamientos Localizados o Clusters, Hits o eventos de emisión acústica encontrados en los ensayos realizados, ya sean relevantes y no relevantes, deben ser registradas y evaluadas de acuerdo a las exigencias del estándar que aplique.

Los Agrupamiento Localizados o Clusters deben ser representados gráficamente de forma rectangular o circular. El resultado de las agrupaciones seguirá una escala preestablecida para cada nivel de eventos que aparecen a lo largo del tiempo en cada cluster. Los parámetros de evaluación serán: el nivel de actividad de EA, el nivel de energía (MARSE), el conteo de hits versus la correlación de amplitud como indicativo de la naturaleza de la fuente que origina los datos o las fallas reales, el ruido de fondo etc.

A continuación, se muestra la Tabla 1, utilizada para la clasificación de fondos de tanque de forma cuantitativa basado en sus parámetros de EA, en la cual enfocaremos nuestro análisis:

Tabla 1 – Clasificación de tanques basado en parámetros de EA

Grado	Actividad de las fuentes de EA	Parámetros	Criticidad	Período máximo recomendado hasta la próxima inspección (años)	
I	Ninguna Fuente de EA hallada	Amplitud	Menor que 65 dB	Baja	5
		Conteo de hits	entre 750 y 1300		
		Energía (MARSE)	mayor que 10 000 conteos		
		Agrupamientos localizados	1 como máximo		
		Tiempo de subida	mayor que 600 μ s		
II	Fuente de EA leve hallada	Amplitud	mayor que 65 dB	Media	2
		Conteo de hits	entre 750 y 1 200		
		Energía (MARSE)	mayor que 100 000 conteos		
		Agrupamientos localizados	3 como máximo		
		Tiempo de subida	mayor que 500 μ s		
III	Fuente de EA moderada hallada	Amplitud	mayor que 75 dB	Alta	1
		Conteo de hits	entre 800 y 1100		
		Energía (MARSE)	mayor que 100 000 conteos		
		Agrupamientos localizados	5 como máximo		
		Tiempo de subida	mayor que 400 μ s		
IV	Fuente de EA Severa Hallada	Amplitud	mayor que 85 dB	Muy alta	-
		Conteo de hits	entre 900 y 1000		
		Energía (MARSE)	mayor que 1 000 000 conteos		
		Agrupamiento localizado	Mayor que 5		
		Tiempo de subida	mayor que 300 μ s		

5. RESULTADOS

Para el desarrollo de este proyecto fueron contemplados datos recopilados de ensayos realizados entre enero de 2017 y abril de 2019 en los países de Perú, Bolivia, Argentina y Venezuela. El ensayo de emisión acústica fue realizado en estos equipos, previo a efectuar su apertura para inspección o mantenimiento, en pro de recopilar información para la propuesta del criterio cuantitativo.

La muestra está constituida por un total de 120 tanques con diámetros comprendidos entre 10 y 32 metros, con fluidos de servicio tales como agua cruda, agua desmineralizada, azufre, crudo, metanol crudo, metanol refinado y MTB. A continuación, se presentan los datos de la investigación:

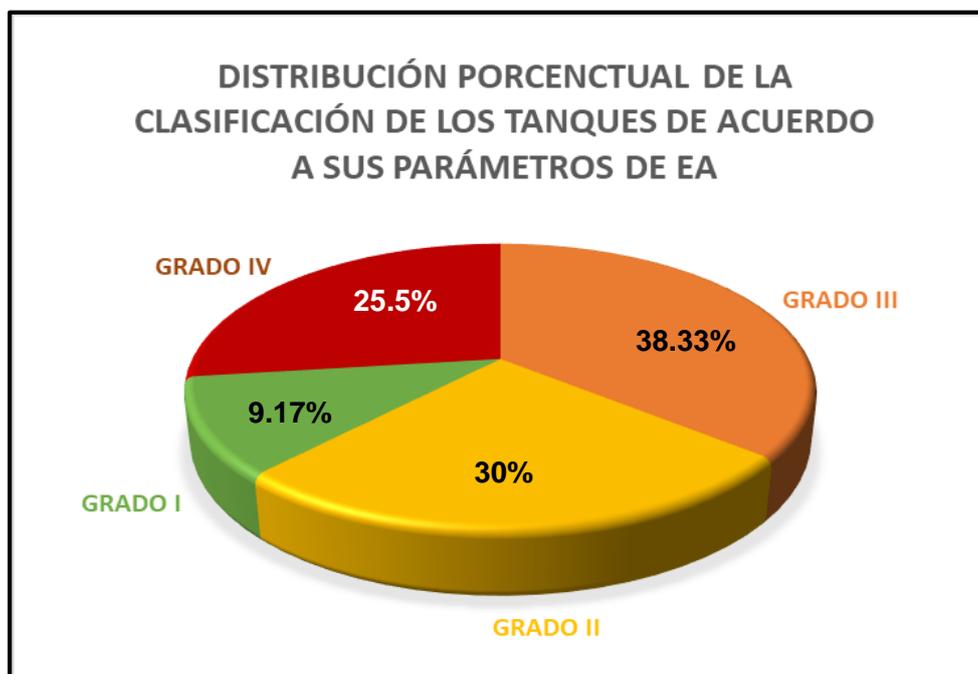


Figura 1 – Distribución porcentual de la clasificación de los tanques.

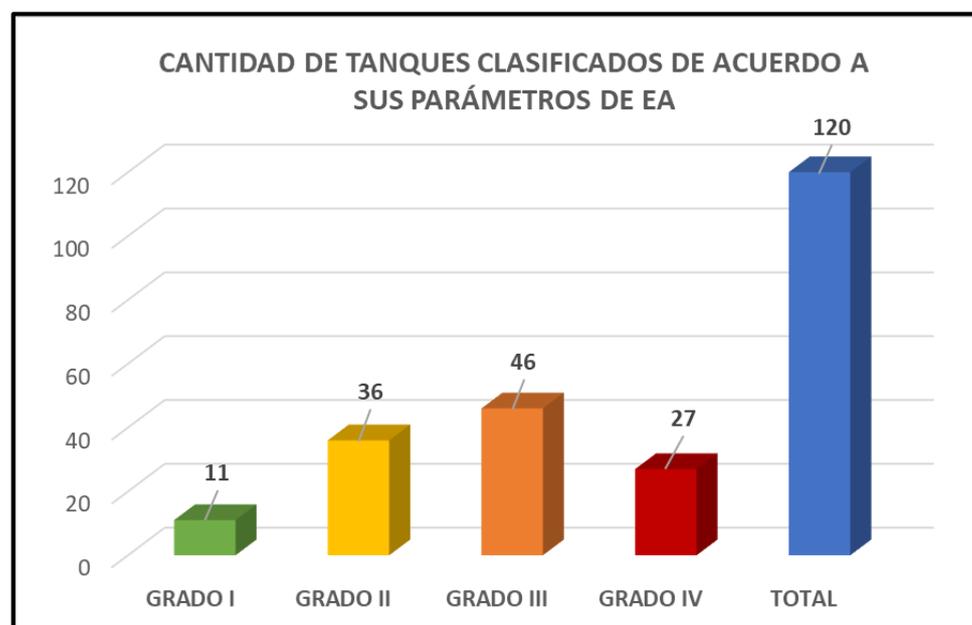


Figura 2 – Cantidad de equipos clasificados basado en sus parámetros de EA.

6. ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS

Partiendo de los resultados obtenidos en los ensayos de emisión acústica, realizados en los 120 tanques en distintos países de Latinoamérica que manejan variedad distintos productos, podemos analizar lo siguiente:

- **GRADO I:** Once (11) de los tanques inspeccionados fueron clasificados como **GRADO I**, durante el ensayo estos presentaron eventos de emisión acústica aleatorios con amplitudes no mayor a 65 dB, energía acumulada que ronda los 10000 conteos, la cantidad de hits encontrados no fue mayor a 1300, presentaron una o ninguna agrupación de eventos de emisión acústica o Clusters, el tiempo de subida en todas las oportunidades fue mayor 600 μs. Luego de realizada la apertura del equipo para inspección interna se

verifico que, el piso del tanque se encontraba en buen estado sin presencia de corrosión o discontinuidad que ameritara reparación. Si la apertura del equipo hubiera dependido del ensayo de emisión acústica, los resultados hubieran indicado que no está no era necesaria y podría haberse extendido la intervención hasta la próxima de inspección planificada.

- **GRADO II:** Treinta y seis (36) de los equipos se clasificaron como **GRADO II**. Se detectaron múltiples eventos de emisión acústica, llegando a identificarse hasta tres (3) agrupaciones de eventos con amplitudes mayores de los 65 dB pero sin superar los 75 dB, la cantidad de Hits no superó los 1200, la energía acumulada no excedió los 100000. Presentó tiempo de subida mayor a 500 μ s. En estos equipos durante la inspección interna se encontró el piso en buenas condiciones, llegando a realizarse reparaciones menores en zonas cercanas a los Clusters previamente detectados, estas reparaciones no era motivo de intervención de los tanques. Con base en el criterio de clasificación cuantitativo, estos equipos no hubieran requerido apertura para la fecha en la que fueron inspeccionados.
- **GRADO III:** Cuarenta y seis (46) tanques se clasificaron como **GRADO III**. Se detectaron hasta 5 agrupaciones claramente identificables con amplitudes que iban desde los 75 dB hasta los 85dB, una cantidad de hits hasta 1100, energía superior a 100.000 pero sin alcanzar 1.000.000, el tiempo de subida rondaba los 400 μ s o superior. Durante la inspección interna de estos equipos, se observó claramente activa la corrosión en el fondo de los tanques, llegando a realizarse múltiples reparaciones en los lugares donde se encontraban las agrupaciones de eventos más significativas. Basados en el criterio cuantitativo, estos equipos se le asignaría una **Criticidad ALTA** llegando a requerir apertura como máximo a 1 año de realizada la emisión acústica, esto también estaría sujeto a el tipo de fluido que maneje el tanque y los riesgos asociados a una posible fuga.
- **GRADO IV:** Veintisiete (27) de los equipos inspeccionados fueron clasificados como **GRADO IV**. Se detectaron múltiples agrupamientos de eventos (mayores a 5), amplitudes elevadas a partir de 85 dB, conteos de Hits que rondaban los 1000, energía acumulada mayor a 1.000.000, tiempo de subida en valores cercanos a los 300 μ s. En estos equipos la corrosión en el piso del tanque era severa, llegando a presentar fugas y presencia de grietas. Requerían reparaciones de gran magnitud. Basándonos en el criterio cuantitativo, estos equipos tendrían una **Criticidad MUY ALTA** requiriendo la intervención inmediata del equipo.

7. CONCLUSIONES

- El criterio de clasificación cuantitativo para el fondo de los tanques basándose en parámetros de EA, es representativo y permite tener una idea clara de cuan severos son los daños presentes en los fondos de los tanques.
- Permite una disminución de los costos y una mejor optimización de los recursos involucrados en la decisión de sacar en servicio un tanque ante la posibilidad de ocurrencia de una fuga, si el fondo se encuentra en buen estado y un aprovechamiento superior de las posibles reparaciones de los mismos.
- Es posible cuadrar un mejor cronograma de intervención y apertura de un tanque más allá del cálculo conservativo de las normas de Inspecciones en Servicio sin necesidad de una Análisis de Riesgos, utilizando el criterio cuantitativo, lo que lleva a un mejor análisis de la inspección basada en riesgo (RBI) del tanque, para la evaluación del estado y de los intervalos de inspección.
- Se logra una disminución del impacto ambiental debido a la falta de necesidad de remoción de residuos o barros depositados en el fondo del tanque para la inspección interna si el fondo se encuentra en buen estado.

- Se reduce la incertidumbre de la condición en que se encuentra el fondo del tanque, pudiendo detectar la presencia de procesos corrosivos o fugas sin necesidad de su apertura.

REFERENCIAS

- IRAM, Instituto Argentino de Normalización y Certificación, IRAM 725 Emisión acústica. Principios generales del ensayo por emisión acústica (EA) para la detección de la corrosión en un recipiente metálico lleno de líquido; 2019.
- AENOR, Asociación española de Normas, UNE EN 15856 : 2010 - Non-destructive testing - acoustic emission - general principles of ae testing for the detection of corrosion within metallic surrounding filled with liquid
- ISO, International Standard Organization, ISO 18081:2016 – Non-destructive testing - Acoustic emission testing (AT) - Leak detection by means of acoustic emisión.
- E. Hodaei, M. Javadi, A. Broumandnia, H.Sadeghi, Evaluation of Acoustic Emission Inspection of Oil Tank Floor via Tank Bottom Plates Thickness Measurement. Journal of Mechanical Research and Application., Vol. 4, No. 3, 37-44, 2012.
- P.J. van de Loo and B. Herrmann, .How Reliable is Acoustic Emission (AE) Tank Testing?. - The Quantified Results of an AE User Group Correlation Study, 7th European Conference on NDT, 1998.
- P. Tscheliesnig, G. Lackner, M . Gori, H. Vallen, P.J. van de Loo, and B. Herrmann, .Inspection of Flat Bottomed Storage Tanks by Acoustical Methods. Classification of Corrosion Related Signals., presented at the 24th EWGAE Conference, 2000.
- Synthesis Report of the EC Standards, Measurements and Testing Contract Nr. SMT4-CT97-2177, Inspection of Flat Bottomed Storage Tanks by Acoustical Methods, 2000.
- G. Lackner and P. Tscheliesnig, Acoustic emission testing on flat-bottomed storage tanks: How to condense acquired data to a reliable statement regarding floor condition institute for technical physics, TÜV Austria, Vienna, Austria. 2002.
- Jonathan J. Scholey, Paul D. Wilcox, Michael R. Wisnom, Mike I. Friswell, Martyn Pavier and Mohammad R Aliha, A generic technique for acoustic emission source location. Journal of Acoustic Emission, Volume 27, 2009.

ESTUDIO DE LA PROPAGACIÓN DE FISURAS MEDIANTE EMISIÓN ACÚSTICA.

Vatcoff. L.^a, Santarelli .E.^b..Manziona. P.^b

^a Grupo OAT, Departamento de Mecánica Aplicada, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional del Comahue

^b Centro de Ciencia y Tecnología de Materiales, Departamento de Mecánica Aplicada, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional del Comahue

e-mail: l.vatcoff@gmail.com, edgardo.santarelli@fain.uncoma.edu.ar

RESUMEN

El presente trabajo tiene como objetivo estudiar los fenómenos que intervienen en la propagación de las fisuras a través de un material. El objetivo es determinar una relación entre los parámetros de las señales de emisión acústica emitidas por una fisura al propagarse y las teorías de mecánica de la fractura. Cada mecanismo de fractura es caracterizado por parámetros diferentes, para nuestro estudio nos centraremos en aquellos que cuantifiquen la energía que se libera en el proceso de propagación de una fisura. En la mecánica de la fractura elástica (MFEL) el parámetro estudiado es la tasa de liberación de energía “G”, mientras que en la mecánica de la fractura elastoplástica (MFEP) es la “Integral J”, parámetro que caracteriza los campos de tensiones y deformaciones en la punta de la fisura, que conceptualmente es un parámetro energético análogo a G, aunque cuantifica energía consumida en deformación plástica. Otro parámetro elásto-plástico es el desplazamiento de Apertura de la punta de fisura “CTOD” (Crack Tip Opening Displacement.), que está relacionada con la Integral J. El estudio se realizó sobre una probeta de acero prefisurada sometida a flexión. No quedando por ello limitado el estudio solo a materiales metálicos.

Palabras Clave: Emisión acústica, Mecánica de la fractura, Crecimiento de fisuras

1. INTRODUCCIÓN

Entre las técnicas de ensayos no destructivos, la emisión acústica es sin duda una de las más apropiadas para el estudio de la propagación de fisuras en un material.

La emisión acústica (E.A) es una onda elástica que viaja a través del material como resultado de una liberación de energía. La fuente de energía de E.A proviene de la variación del campo de tensiones dentro del material.

En el caso de una fisura que se está propagando, la generación de una nueva superficie de fractura está acompañada por un cambio en el campo de tensiones en la punta de fisura, actuando esto como fuentes de emisión acústica.

Sobre la base de los principios físicos explicados anteriormente se pretende estudiar la relación entre las señales de E.A y los parámetros que caracterizan la mecánica de la fractura.

2. DESARROLLO EXPERIMENTAL

2.1 Materiales utilizados.

Para el desarrollo de los ensayos fueron utilizadas dos probetas de ASTM A514 Gr T. La composición química de las mismas se muestra en la Tabla 1.

	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni
Probeta 1	0,081	0,16	1,53	0,016	0,005	0,006	0,189
Probeta 2	0,085	0,16	1,61	0,016	0,004	0,008	0,181

Tabla 1 : Composición química de las probetas (en % wt)

Las probetas fueron prefisuradas bajo el procedimiento descrito en la norma ASTM E1820-11.

En la Tabla 2 se muestran las dimensiones de las probetas ensayadas.

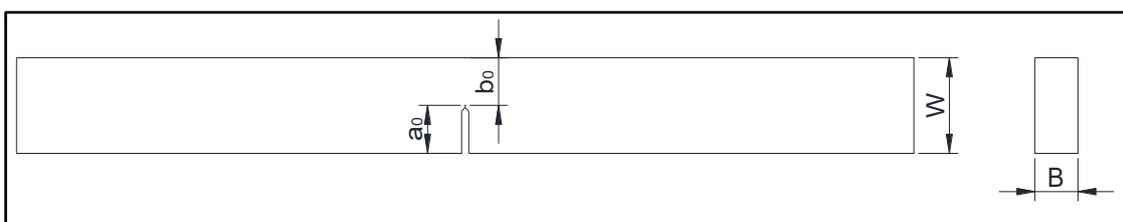


Figura 1: Esquema de la probetas

	Probeta 1	Probeta 2
W [mm]	24,3	25,2
B [mm]	12,7	12,6
a ₀ [mm]	12,17	12,81
b ₀ [mm]	13,1	12,5

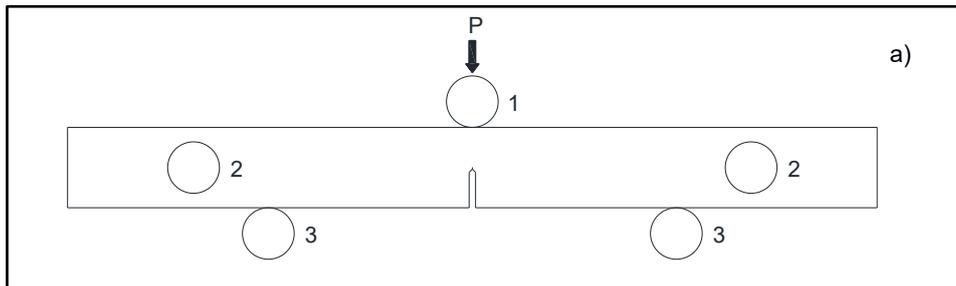
Tabla 2: Dimensiones de las probetas

2.2 Instrumentación.

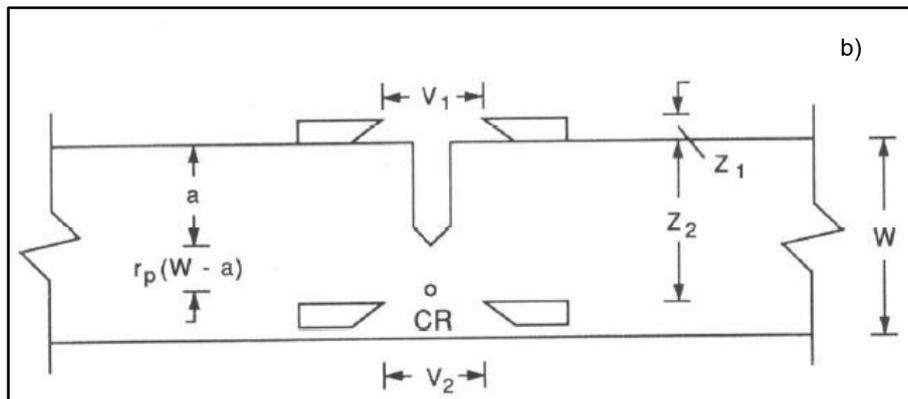
Mediante un ensayo de flexión en tres puntos se carga la probeta hasta identificar que la fisura preexistente se propaga, durante toda la prueba se registró la actividad acústica y el desplazamiento de apertura del frente de fisura.

Para registrar las señales de emisión acústica se utilizó un equipo AMSY-6 de la compañía Vallen. Durante la prueba se utilizaron dos sensores, VS 150 RIC resonantes de 150 KHz, con un preamplificador integrado de 34 dB.

Para registrar el crecimiento estable de fisura como método de única probeta se utilizó el método del doble clip gauge. La instrumentación se muestra en la Figura 2.



- 1: Punto de aplicación de la carga
- 2: Sensores de E.A
- 3: Rodillos de apoyo.



- V1: Medición del desplazamiento de apertura del frente de fisura.
- V2: Medición del desplazamiento de apertura del frente de fisura.
- Z1: Distancia al clip gauge 1
- Z2: Distancia al clip gauge 2

Figura 2: Esquema de la instrumentación: a) esquema de E.A y b) esquema del doble clip gauge

3. RESULTADOS.

3.1 Análisis de las señales de Emisión Acústica

De las señales de emisión acústica los parámetros analizados fueron la energía (E), la intensidad de señal (SS) y la amplitud (A). También fueron analizados los conteos acumulados de la intensidad de señal y la energía.

En ambos ensayos se registró un Hit característico con gran energía, ver Fig. 3, los mismos se registraron en el inicio de la prueba, estos eventos son los de mayor amplitud entre los registrados.

Por otro lado si bien se observa una correspondencia entre los parámetros de E.A para ambos ensayos, los valores difieren significativamente entre ambas probetas.

Estos puntos serán tratados en las siguientes secciones.

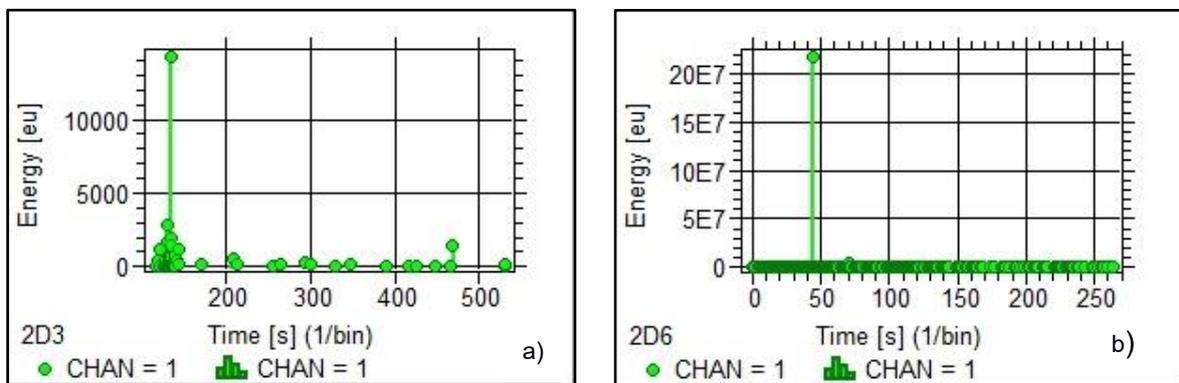


Figura 3: Curva Energía Vs Tiempo a) Probeta 1 y b) Probeta 2

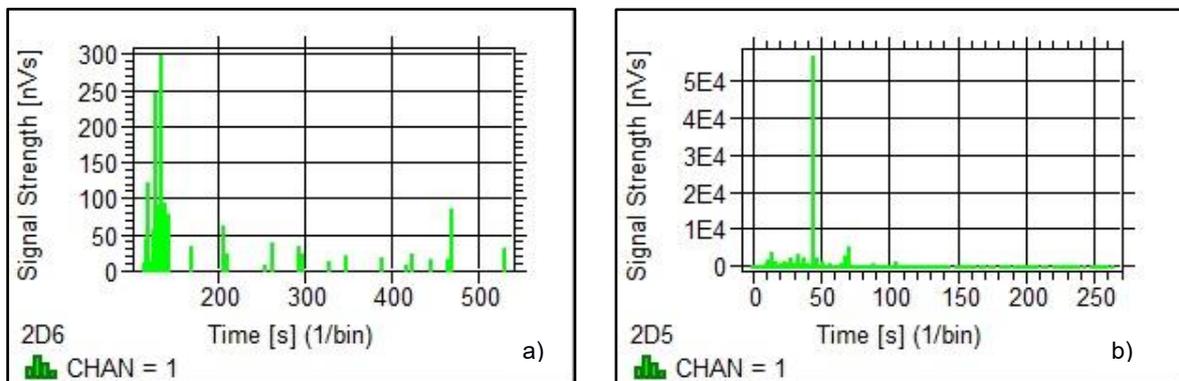


Figura 4: Curva SS Vs Tiempo a) Probeta 1 y b) Probeta 2

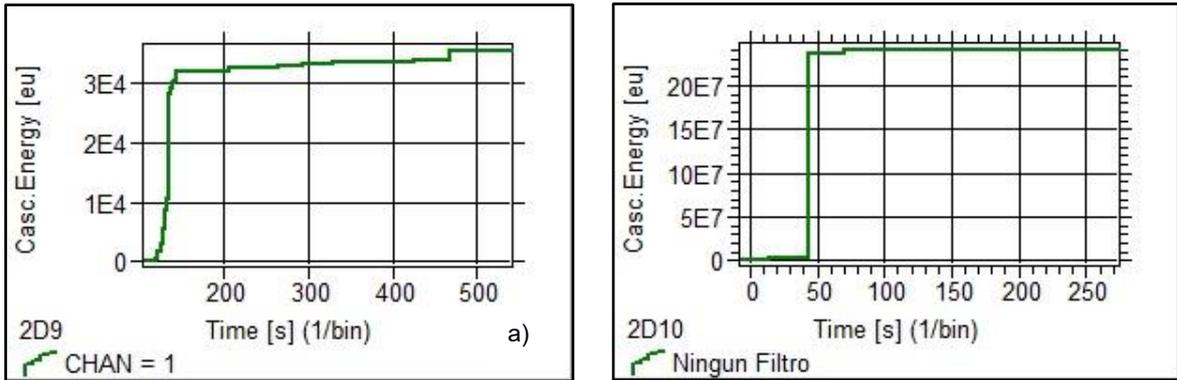


Figura 5: Curva acumulada de Energía a) Probeta 1 y b) Probeta 2

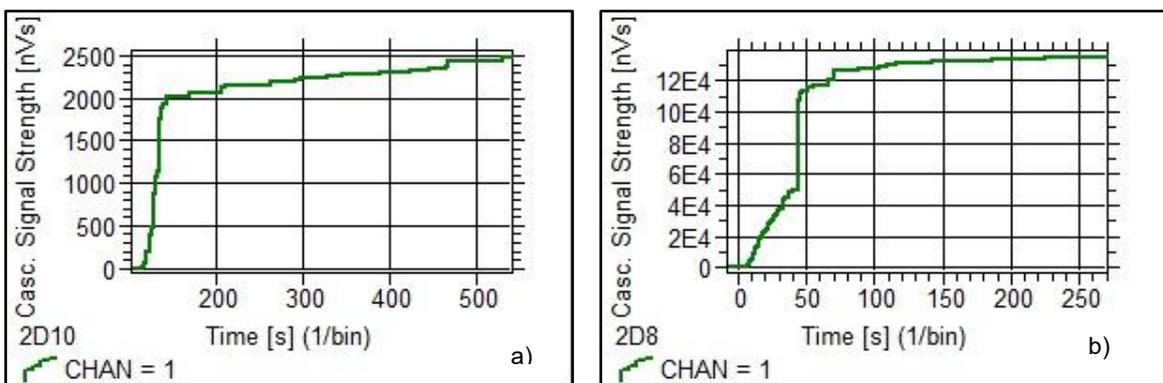
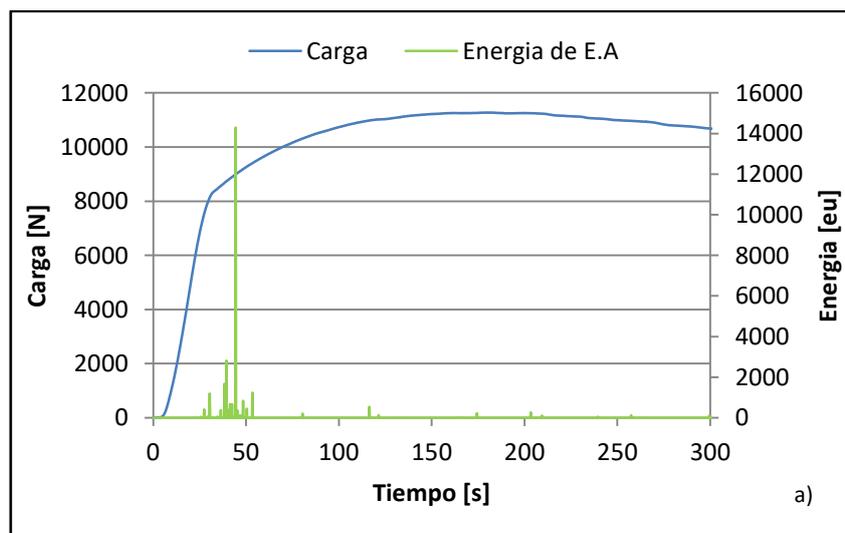


Figura 6: Curva acumulada de la intensidad de señal: a) Probeta 1 y b) Probeta 2

Dado que la prueba de flexión y la medición de E.A se realizaron simultáneamente, como primer paso se correlacionaron los gráficos Carga vs tiempo con los parámetros de emisión acústica para ambas probetas.



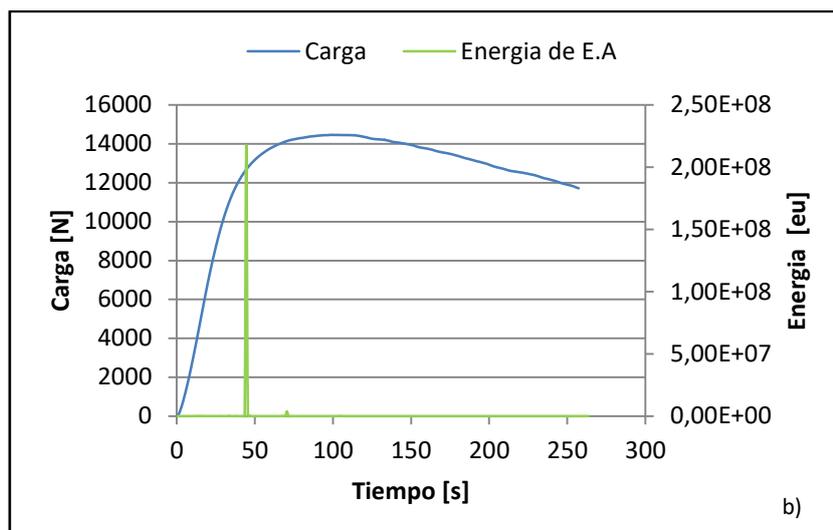


Figura 7: Variación de la energía de E.A y la carga con el tiempo: a) Probeta 1 y b) Probeta 2

Para ambas probetas el Hit con mayor energía se registró antes de llegar a carga máxima ver Fig. 7.

A su vez esto también se cumple para el caso del análisis sobre la intensidad de señal (SS) ver Fig. 8.

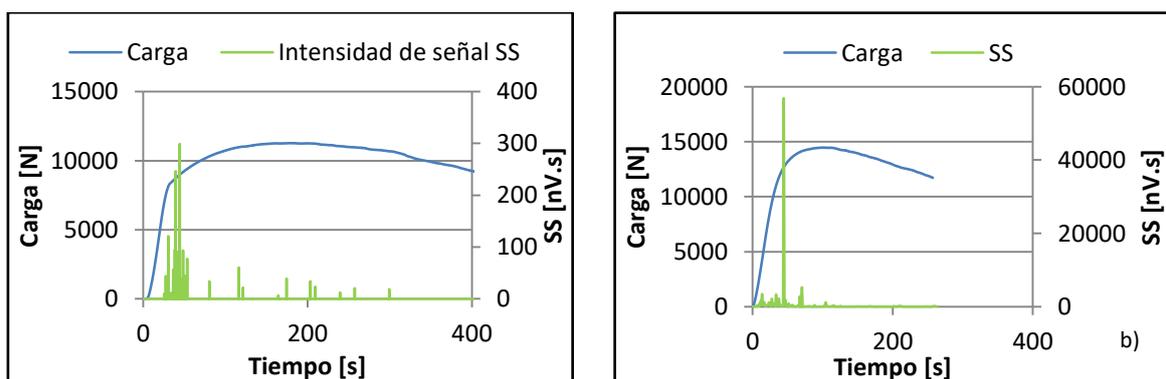


Figura 8: Variación de la intensidad de señal y la carga con el tiempo: a) Probeta 1 y b) Probeta 2

Las curvas acumuladas de la intensidad de señal (CSS), muestran un comportamiento similar evidenciando un salto abrupto en el momento que se produce el Hit de mayor intensidad, sin embargo la Probeta 2 muestra un aumento más gradual de la curva, ver Fig 6, esto será analizado con más detalle en la sección 4.

En la Tabla 3 se muestran los valores de los parámetros de E.A correspondientes al Hit característico.

Probeta	Carga [N]	Tiempo[s]	Amplitud[dB]	Energía[eu]	SS[nV.s]
Probeta 1	8974	43	66,4	14287	299
Probeta 2	12674	44	100	$2,18 \times 10^8$	56871

Tabla N° 3: Valores de los parámetros analizados.

3.2 Medición del crecimiento estable de fisura

Método del doble clip gauge:

Este método establece que para la componente plástica del desplazamiento la probeta se comporta como dos brazos rígidos que rotan alrededor de un punto del ligamento remanente llamado centro aparente de rotación.

Mediante este método se logra medir de forma indirecta, midiendo los desplazamientos V_1 y V_2 , el crecimiento estable de fisura (Δa) en función del tiempo.

$$a = \frac{Z_2 - r_p \cdot W}{1 - r_p} \quad (1)$$

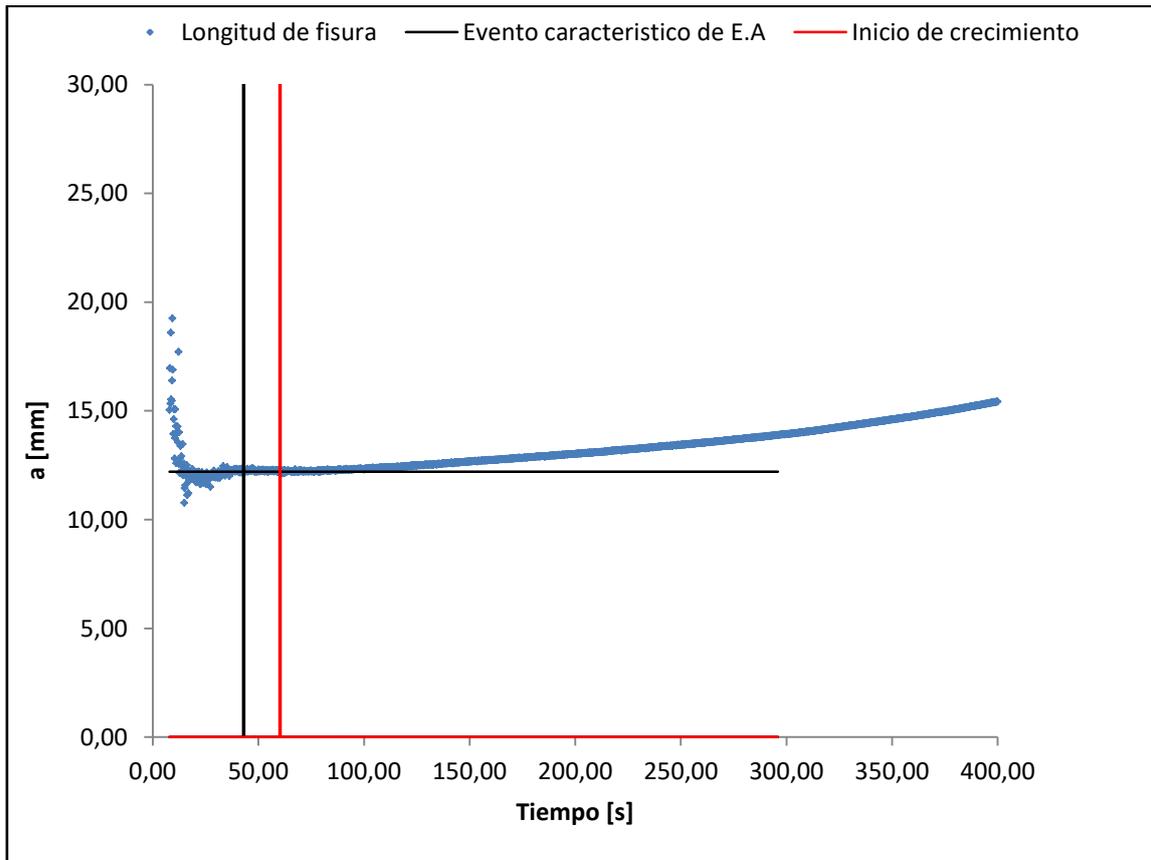


Figura 9: Longitud de fisura “a” Vs tiempo – Probeta 1.

En la Tabla 4 se detallan los resultados obtenidos de la aplicación del método.

Probeta	a_0 [mm]	a_f [mm]	Tiempo del evento de E.A [s]	Tiempo de iniciación [s]	Δa [mm]
Probeta 1	12,17	15,65	43	60	3,48
Probeta 2	12,81	15,46	44	85	2,65

Tabla 4: mediciones del crecimiento estable de fisura.

Como se puede observar en la Tabla 4, hay una diferencia de 23 segundos, en la probeta 1, entre la iniciación del crecimiento registrado por el doble clip y el evento característico de E.A y de 41 segundo para la probeta 2. Esta diferencia será tratada en la sección 4.

La medición de la longitud de fisura en función del tiempo fue necesaria para la construcción de la curva *J-R*.

3.3 Curva *J-R* y determinación de J_Q

3.3.1 Integral *J*

La integral *J* es una expresión matemática, una integral de contorno que encierra el frente de grieta, utilizada para caracterizar el campo tensión – deformación local alrededor del frente de la fisura. “ASTM E1820-11”

Este parámetro representa la liberación de energía, que bajo un estado de tensión determinado, acompañaría la propagación de la fisura una fracción *da*.

El cálculo de “*J*” y la construcción de la curva *J-R* se realizaron siguiendo el procedimiento establecido en la norma ASTM E1820-11.

3.3.2 Curva *J-R*.

Para la probeta 2, con los datos de obtenidos del diagrama carga- desplazamiento y las mediciones de Δa realizadas con el doble clip gauge se construyó la curva *J-R*. Luego mediante la línea de construcción “Blunting line” se determinó J_I y J_Q .

Para determinar J_I se construyó una curva “*J* vs Δa ” para todos los puntos medidos luego donde la Blunting Line intersecta dicha curva queda definido J_I .

Para determinar J_Q se realizó la regresión con los datos encerrados entre las rectas 0,15 y 1,5 , como lo establece la norma ASTM E1820-11. Luego donde la recta 0,2 intersecta dicha curva queda definido J_Q .ver Fig 10

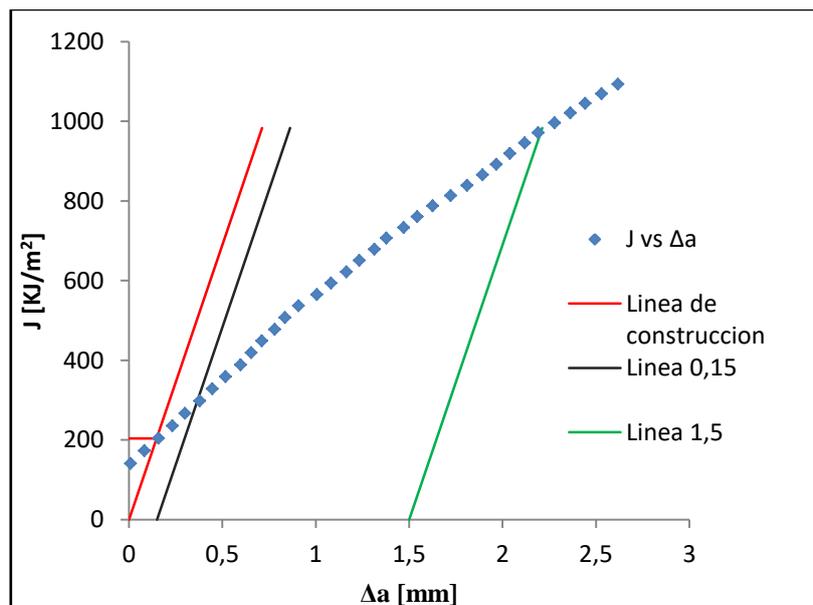


Figura 10a: Determinación de J_I – curva *J* vs Δa - Probeta 2

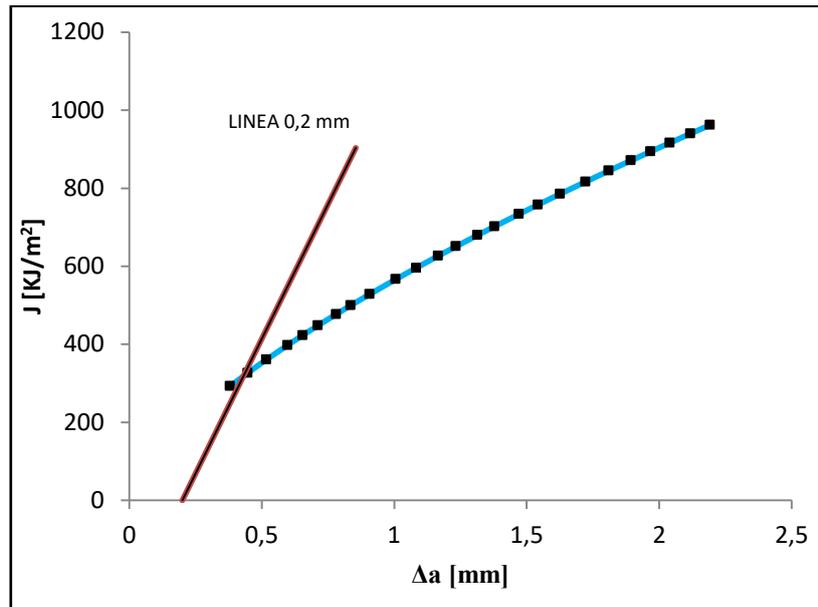


Figura 10b: Determinación de J_Q - Curva J - R

Probeta	J_I [KJ/m ²]	J_Q [KJ/m ²]
Probeta 2	203,8	318,37

J_I : Intersección de la línea de construcción con la curva J - R .

J_Q : Intersección de la línea 0,2mm con la curva J - R .

Tabla 5: valores de J_I y J_Q

3.3.3 Calculo de J para la carga correspondiente al evento característico de E.A.

Para la carga “P” en la cual se registró el evento característico de E.A se calculó el valor de J siguiendo el procedimiento de la norma ASTM E1820-11. Para $a = a_0$

$$K = \left[\frac{P \cdot S}{B \cdot W^{1,5}} \right] \cdot f\left(\frac{a}{W}\right) \quad (2)$$

$$f\left(\frac{a}{W}\right) = \frac{3 \cdot \left(\frac{a}{W}\right)^{1/2} \left[1,99 - \left(\frac{a}{W}\right) \cdot \left(1 - \left(\frac{a}{W}\right)\right) \cdot \left(2,15 - 3,93 \cdot \left(\frac{a}{W}\right) + 2,7 \cdot \left(\frac{a}{W}\right)^2\right) \right]}{2 \cdot \left(1 + 2 \cdot \left(\frac{a}{W}\right)\right) \cdot \left(1 - \left(\frac{a}{W}\right)^{1,5}\right)} \quad (3)$$

$$J = \frac{K^2 \cdot (1 - \nu^2)}{E} + J_{pl} \quad (4)$$

$$J_{pl} = \frac{\eta_{pl} \cdot A_{pl}}{B \cdot b_0} \quad (5)$$

E : 200 GPa

ν : 0,29

η_{pl} : 1,9

A_{pl} : Área plástica.

Probeta	Carga [N]	a_0 [mm]	$J_{(E.A)}$ [KJ/m ²]
Probeta 2	12674	12,81	191,74

$J_{(E.A)}$: Valor de J calculado para la carga del evento característico de E.A

Tabla 6: Valores de J para el evento característico

Comparando estos valores con los obtenidos de la construcción de la curva $J-R$, se observa que los mismos son del orden de J_I , ver Tabla 5. Esta relación será tratada en la sección 4.

4. DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS.

En el proceso de fractura dúctil ocurre la iniciación y crecimiento estable de una grieta este proceso puede ser dividido en los siguientes pasos. ver Fig 11.

- Se produce el enromamiento del frente de grieta (redondeo de la punta de fisura) con las primeras cargas “Blunting”.
- De la punta redondeada se desarrolla una nueva fisura aguda.
- Esta fisura crece de forma estable
- Crecimiento inestable de la fisura.

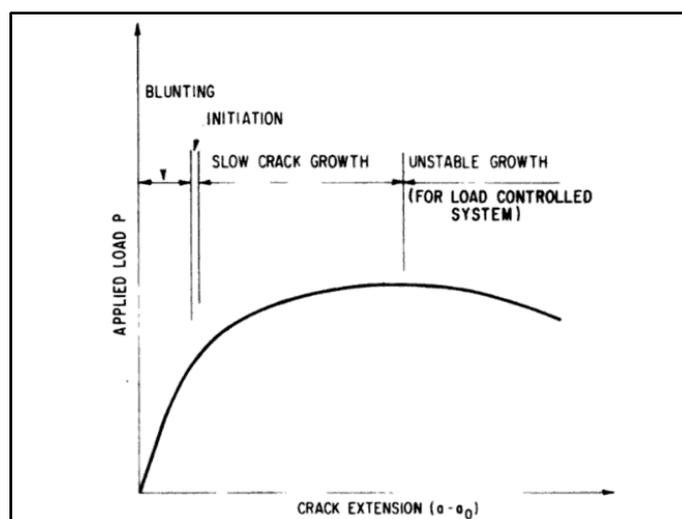


Figura 11: Carga vs Extensión de fisura

“Studies on Crack Initiation and Stable Crack Growth”

A continuación se discutirán los tópicos que surgieron en el análisis de los resultados realizado en la sección 3

4.1 Evento característico.

Durante los dos ensayos fue registrado un evento característico de gran energía, al contrastar el tiempo en el que ocurrió el evento con el tiempo de inicio del crecimiento medido con el método del doble clip gauge se encontraron diferencias de hasta 40 segundos, ver Tabla 4. Al analizar esta diferencia se constató que la misma no es determinante, ya que se debe a la sensibilidad del método del doble clip al medir el inicio del crecimiento de fisura. Además se verificó que el crecimiento para esta diferencia de tiempos es de 0,2 mm, un margen de error aceptable en la ingeniería.

4.2 Atenuación

En la Figura 7 y 8 se observa que tanto para la Energía de emisión acústica, y la Intensidad de señal, en ambas probetas, las señales de mayor valor se registraron en el inicio de la zona plástica, sin embargo estos valores difieren entre ambos ensayos. La diferencia más notable entre ambas probetas es el sentido de laminación, una variable que no había sido tomada en cuenta hasta el momento, pudiéndose deber a esto la atenuación de las señales.

4.3 Comparación de los valores de la integral J

Como se explicó en la sección 3 se calculó los valores J mediante la curva J vs Δa y para la carga en la cual se da el evento característico.

Los valores de J que surgen de la intersección de la Blunting Line (Línea de construcción) con la curva J vs Δa se mantienen dentro del orden con respecto a los valores calculados para la carga en la que se da el evento de emisión acústica de mayor intensidad. Esto nos lleva a pensar que el evento característico de E.A marca la iniciación del crecimiento estable de la fisura.

Probeta	$J_{(E.A)} [KJ/m^2]$	$J_I [KJ/m^2]$	$J_Q [KJ/m^2]$
Probeta 2	191,74	203,8	318,37

$J_{(E.A)}$: Valor de J calculado para la carga del evento característico de E.A

J_I : Valor de J calculado con la intersección de la Blunting Line y la curva J vs Δa .

Tabla 7: Comparación de los valores de J

La diferencia de los valores de J se podría deber a varios factores, a continuación se detallan algunos de los mismos.

1) La Blunting Line:

La línea de construcción o Blunting Line está determinada como, $J = 2 \cdot \sigma_y \cdot \Delta a$, como se observa la pendiente depende de la tensión de fluencia del material, para el siguiente informe se utilizó una tensión de fluencia de 690 MPa, según lo establecido en los manuales para el ASTM A514 Gr T, pero como ya se mencionó anteriormente las probetas poseían un grado de laminación que no había sido tenido en cuenta, pudiendo afectar esto los valores de J.

2) Correlación de los datos para la curva $J-R$.

La correlación de los datos se realiza para los datos que se encuentran entre las rectas 0.15mm y 1.5 mm, pero el valor de J_I se encuentra fuera de estos datos, al hacer la regresión puede que la curva no ajuste los suficientemente bien para estos valores.

5. CONCLUSIONES

1. Mediante la emisión acústica se logró determinar un punto característico el cual podría asociarse a la iniciación del crecimiento estable.
2. Los valores de J calculados para la carga asociada al evento de E.A difieren con los determinados con la curva " J vs Δa " en un 5% para la probeta 2.
3. El grado y sentido de laminación es una variable de consideración a la hora de analizar los valores de los parámetros de la emisión acústica.
4. En el presente trabajo solo fue analizado el evento de E.A de mayor intensidad, no obstante previo a dicho evento se registraron Hits de menor energía los cuales en principio podrían deberse a la gran deformación plástica producida antes de la iniciación del crecimiento estable.

REFERENCIAS

- H.Roy. , N. Parida. , S. Sivrapasad. ,S Tarafder. , K.K. Ray , *Acoustic emissions during fracture toughness tests of steels exhibiting varying ductility* 2007.
- ASTM E1820-11 *Standard Test Method for Measurement of Fracture Toughness*.2011
- J.L.Aranda., J.J Gonzalez *Mecánica de la fractura*.
- P.Manzione., J.E.Perez Ipiña., *Sensitivity Analysis of the Doble Clip Gauge Method*. 1990.
- C.F.Shih, H.G. de Lorenzi., *Studies on Crack Initiation and Stable Crack Growth*. 1979.

SISTEMA PARA LA DETECCIÓN DE CETÁCEOS

Veca, A^a, Valesse, N^b, Ruzzante, J^b, Albalat, A^b, Marino, A^b, Reyes, V^b

^aInstituto de Automática, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de San Juan, ARGENTINA

^bGrupo de Investigación en Acústica Submarina, Universidad Nacional de Tres de Febrero, ARGENTINA

e-mail: aveca@inaut.unsj.edu.ar

RESUMEN

El trabajo describe el desarrollo de un sistema acústico para la detección de delfines, ballenas y orcas orientado al cómputo de su actividad en el sur argentino. Está compuesto de un micrófono piezoeléctrico, omnidireccional que fue diseñado y construido especialmente para esta aplicación específica. Presenta un ancho de banda de 150 KHz. Las señales captadas por el micrófono son procesadas por un algoritmo digital basado en la identificación de patrones, que selecciona la información de interés, almacenándola en una memoria temporal. Una vez completada la capacidad de la memoria, los datos se envían vía wifi a una estación terrestre ubicada a 6 km de distancia, para su análisis. El sistema estará anclado a una profundidad de 40 metros y sumergido a una profundidad de 20 metros. Presenta una autonomía de dos meses. A la fecha, los ensayos en ambiente de laboratorio con el uso de patrones de emisión acústica de cetáceos, obtenidos en ambiente natural, indican que el sistema tiene capacidad de cumplir con el objetivo propuesto.

Palabras Clave: Cetáceos, patrón de emisión, acústica subacuática

1. INTRODUCCIÓN

En la naturaleza, existen un importante número de especies que utilizan el sonido para comunicarse con sus crías y para la eco-localización o biosonar, es decir, para detectar obstáculos y para la búsqueda y localización de sus presas. En prácticamente todos los casos utilizan la técnica pulso-eco con frecuencias superiores a 20 KHz (ver Fig. 1). En el aire, la especie que optimiza la eco-localización es el murciélago.

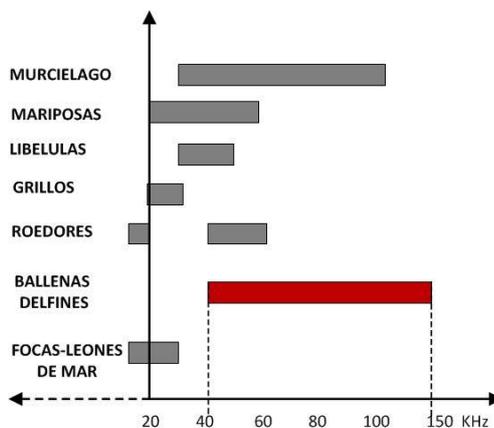


Fig. 1. Espectro acústico en la naturaleza

En el agua, dentro de los cetáceos, denominados odontocetos han desarrollado un sistema de biosonar que les permite detectar, localizar y caracterizar objetos debajo del agua, incluyendo presas y obstáculos, entre otros.

Como puede observarse, el ancho de banda de la emisión de estas especies, está comprendido entre 40 KHz y 150 KHz. Los sonidos que emiten pueden ser registrados durante extensos o breves períodos de tiempo utilizando herramientas de monitoreo acústico pasivo, en tiempo real utilizando hidrófonos autónomos que almacenan la información en su interior. Al igual que todas las especies que emplean la eco-localización, las señales acústicas emitidas por los cetáceos son únicas en cada especie, permitiendo obtener información importante acerca de su comportamiento, mediante el estudio de la señal acústica que emiten, permitiendo realizar una gran diversidad de estudios de forma no invasiva. A diferencia del aire, la propagación de las ondas acústicas en el agua, están favorecidas por la velocidad de propagación del sonido y por el valor de la impedancia acústica. Esto permite que la energía acústica se propague a grandes distancias con reducida atenuación. Como inconvenientes se tiene que son afectadas por la frecuencia de trabajo, por las pérdidas por absorción y por el ruido presente en el medio.

Este trabajo presenta los estudios preliminares orientados al desarrollo de un prototipo de sistema electrónico para el reconocimiento de sonidos emitidos por las distintas especies de cetácios y transmitirlos a una estación ubicada en la costa para su posterior análisis.

El objetivo principal es el desarrollo de un sistema acústico para la detección acústica de delfines, ballenas y orcas en el mar argentino, orientado a la trazabilidad de su actividad.

Como objetivos particulares, tomar experiencia en el desarrollo de sistemas automáticos para la toma de señales en ambiente hostil y transmisión de datos a una estación autónoma ubicada en la costa. El esquema general del sistema se muestra en la Fig. 2. La zonda de medición que estará sumergida a una profundidad de 20 metros, contiene en su interior un micrófono omnidireccional y un amplificador.

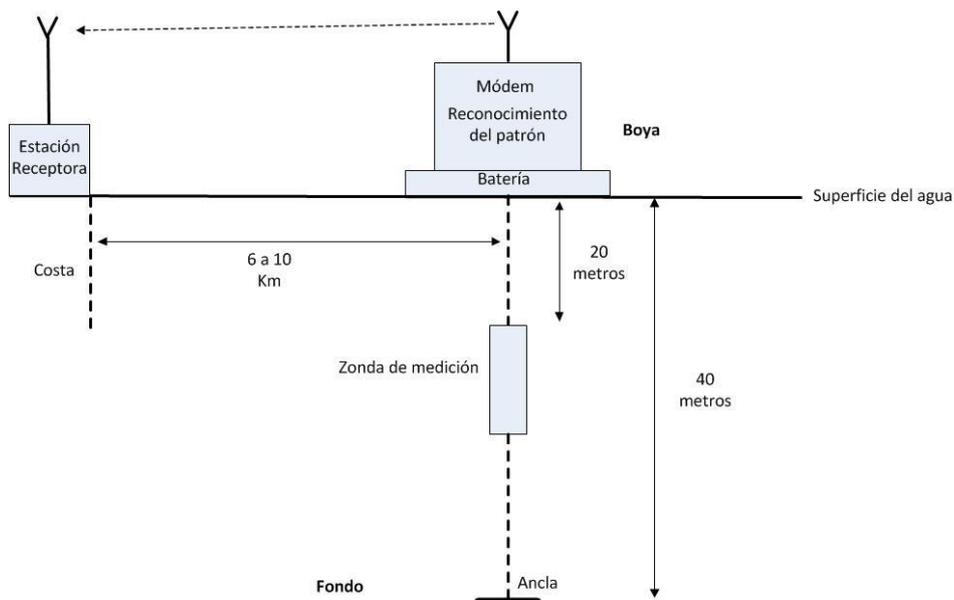


Fig. 2. Esquema del sistema a desarrollar

En la boya se encuentra el sistema electrónico para el reconocimiento de las señales acústicas captadas por la zonda, un digitalizador con su correspondiente memoria, las baterías y un módem para la transmisión de las señales a la estación terminal ubicada en la costa.

2. CARACTERÍSTICAS DEL AMBIENTE DE TRABAJO

- VELOCIDAD DEL SONIDO

Como ya se mencionó, acústicamente hablando, el ambiente marino está caracterizado por la velocidad de propagación del sonido, las pérdidas por absorción y por el ruido. El perfil de la velocidad del sonido con la profundidad que se muestra en la Fig. 3 (Kinsler et al, 1980) está dividido en cuatro zonas, siendo la primera (capa superficial) la que interesa en este caso ya que, la zonda estará sumergida a una profundidad de 20 metros. Esta capa está influenciada fundamentalmente por las variables meteorológicas locales. La velocidad del sonido decrece con un leve gradiente negativo, tomando un valor aproximado de 1495 m/s. La capa superficial presenta características de agua isotérmica mezclada por la acción del viento sobre la superficie del océano. El sonido tiende a ser atrapado por las reflexiones en la superficie y las refracciones hacia arriba desde el fondo, por cambio de impedancia acústica. (ver Fig. 4).

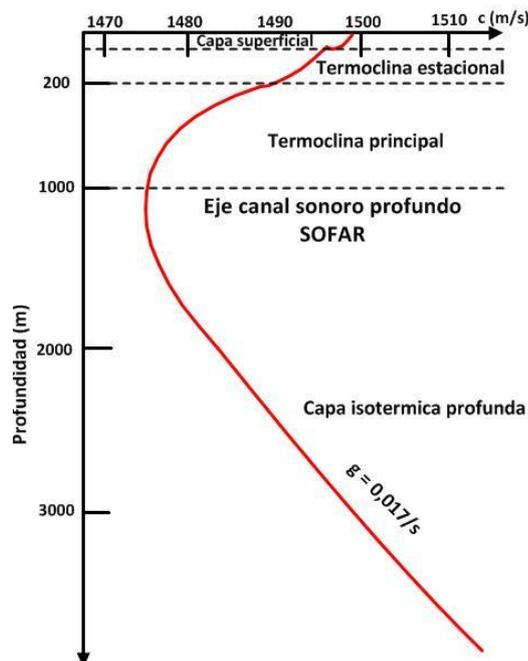


Fig. 3. Perfil de la velocidad del sonido con la profundidad

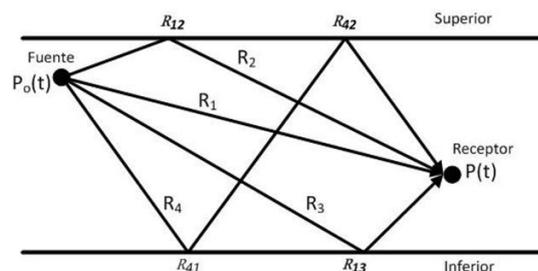


Fig. 4. Reflexiones y refracciones de la onda acústica en la capa superficial

- PERDIDAS

Si se considera que el frente de ondas es esférico las pérdidas de absorción están dadas por:

$$TL(dB) = 10 * \log(r) + \alpha r * 10^{-3} \quad (1)$$

donde r es la distancia fuente receptor en km y α el coeficiente de absorción en dB/km. α es función de la frecuencia de trabajo (f), utilizándose para su cómputo, la siguiente expresión:

$$\alpha = 0,11 \frac{f^2}{1+f^2} + 44 \frac{f^2}{(4100+f^2)} + 0,000275f^2 + 0,0003 \quad (2)$$

Como la frecuencia de emisión está comprendida entre 90 KHz y 150 KHz (Valese, 2017), la atenuación por absorción, toma los siguientes valores:

Para f = 90 KHz, $\alpha=29$ dB/km y para f = 150 KHz, $\alpha= 32.7$ dB/km. Suponiendo una distancia fuente-receptor de 10 km, la atenuación por absorción arroja los siguientes valores: para f = 90 KHz, TL = 10,31 dB y para f = 150 KHz, TL = 10,43 dB. Estas cifras están corroborando la reducida atenuación del frente de onda acústica en el agua.

- RUIDO

En el océano, las fuentes son de diferente naturaleza; el producido por las corrientes de agua, por burbujas debido a procesos no lineales, al paso de embarcaciones, al movimiento de las olas, el producido por bancos de peces, entre otros. La Fig. 4 muestra un registro analógico (izquierda abajo), espectrograma (izquierda arriba) y el espectro de densidad de ruido (derecha). El espectrograma y el registro de nivel de ruido, están referidos a 1uPa. Como se observa, las bajas frecuencias presentan mayor nivel en el espectro, 110 dB en las cercanías de 1 Hz debido a la baja atenuación a bajas frecuencias, mientras que la media se encuentra en el orden de 80 dB.

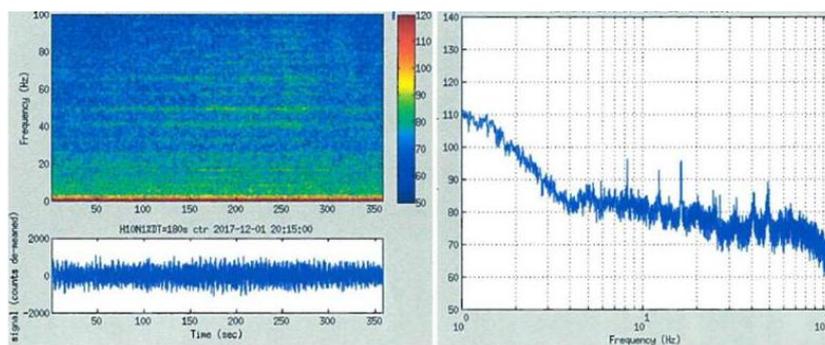


Fig. 4. Niveles de ruido

Del análisis, se concluye que la media del nivel de ruido pertenece a bandas de frecuencias muy inferiores al rango de frecuencias emitidas por los cetáceos, presentando una influencia salvable. Además, el perfil del lecho marino a la distancia a que se encontrará la zonda es similar al indicado en la Fig. 5, presentando características de filtro pasa bajos (Medwin, 1998).

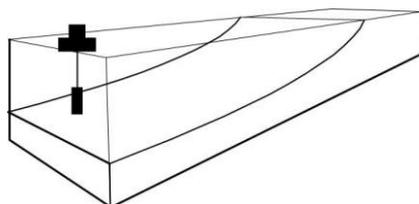


Fig. 5. Perfil del lecho marino donde se encontrará la zonda

3. SEÑAL DE EMISION ACUSTICA EMITIDA

En la Fig. 6 se muestra una secuencia típica de emisión de cetáceos, denominada clicks. Los clicks están caracterizados por ser emitidos en forma de un tren de pulsos sucesivos entre 50 y 200 μ s con frecuencia de repetición entre 6 y 256 clicks/s (Marino, 2017). En este caso el click está formado por tres pulsos

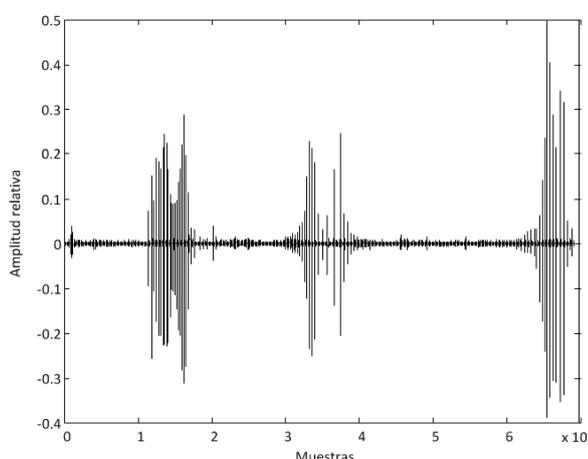


Fig. 6. Secuencia de eco localización de delfín

Si el sistema transmitiera a la estación receptora ubicada en la costa, todos los sonidos que registrara la zonda, el módem transmisor debería estar siempre activo. Teniendo en cuenta las especificaciones técnicas del módem, el consumo de 1 Amp/h imposibilitaría una autonomía razonable del sistema. A este consumo se debería agregar el consumo del resto de los sistemas electrónicos. Para paliar este inconveniente, se optó por desarrollar un criterio simple para el reconocimiento de la señal de interés. Para ello, se optó por el criterio usado en emisión acústica (Ruzzante, J., et al, 2005) y en la determinación de tiempo de transito por umbral para señales de ultrasonido (Veca, A., et al, 2016). Esto es, utilizar un umbral de decisión por arriba del ruido presente en la señal y una ventana temporal que tiene en cuenta la media de la separación de los clicks, como se muestra en la Fig. 7.

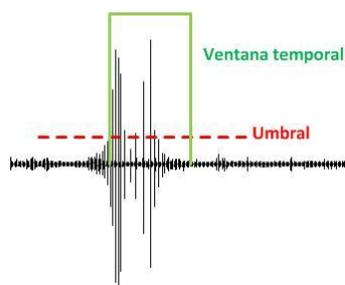


Fig. 7. Umbral y ventana temporal

4. IMPLEMENTACIÓN DEL SISTEMA

Partiendo de la premisa inicial del proyecto de que la zonda debe estar sumergida a 20 metros de profundidad y a una distancia de 6 a 10 km de la costa, se debe asegurar una autonomía razonable de funcionamiento, es decir, por lo menos un mes. La autonomía depende exclusivamente de las baterías. Teniendo en cuenta esta limitación, y en función de lo visto en el apartado anterior, se decidió lo siguiente:

1. De todas las señales acústicas que captará el micrófono, sólo se tendrá en cuenta aquellas que superen el umbral de decisión y que se encuentren entre los límites de la ventana temporal.
2. El umbral de decisión se fijará por encima del nivel de ruido promedio reinante en el medio donde se encuentre anclada la zonda.
3. La ventana temporal tendrá un ancho determinado por la media de los registros estudiados.

La señal captada por el micrófono seguirá dos caminos:

Por un lado ingresará a un bloque denominado "toma de decisión" y otro, será digitalizada con conversor ADC de 16 bits de resolución y con frecuencia de muestreo de 500 KHz. La señal digitalizada ingresará a un buffer circular (pila FIFO). Si el bloque de toma de decisión reconoce que se trata de un click, la información contenida en el buffer, será almacenada en un disco duro de estado sólido. Cuando el disco se llene, todos los clicks almacenados pasarán al módem y serán transmitidos a la estación ubicada en la costa para su posterior análisis. La Fig. 8. muestra el diagrama en bloques de lo descripto.

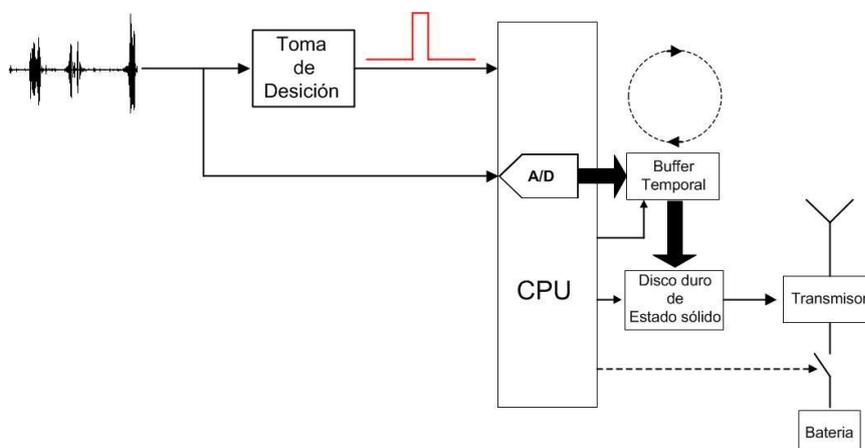


Fig. 8. Diagrama en bloques del sistema de reconocimiento, grabación y transmisión de los datos

El bloque de decisión está compuesto de las siguientes partes:

A la señal captada por el micrófono se la rectifica y por medio de un filtro pasa bajos, se obtiene la envolvente. A continuación, se compara con el umbral y con la ventana temporal. Si cumple con ambas condiciones, se graba en el disco duro. La Fig. 9 muestra en detalles el proceso de decisión.

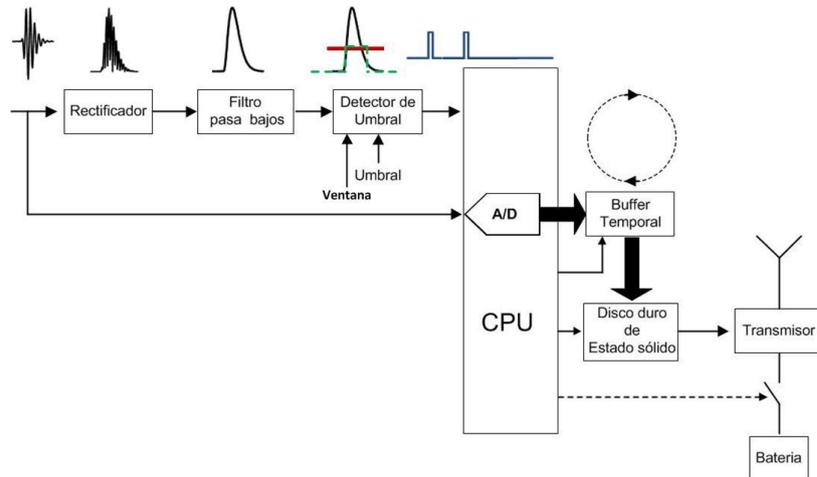


Fig. 9. Detalle del bloque de decisión

5. ENSAYOS DE SIMULACIÓN EN LABORATORIO

A los fines de prueba del sistema desarrollado, se llevaron a cabo una serie de ensayos en laboratorio, los que consistieron en emular en entorno de la zonda y las señales emitidas por los cetáceos. Para simular el entorno marino se usó una pecera (ver Fig. 10). En su interior se encuentra el emisor piezoeléctrico que se encuentra conectado al emulador de los sonidos emitidos por los cetáceos. Los sonidos fueron generados por medio de un sintetizador electrónico, programable por software (ver Fig. 11). En el lado opuesto, se encuentra un receptor piezoeléctrico que simula al micrófono ubicado en la zonda

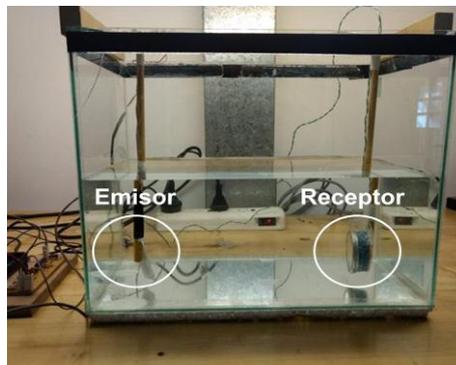


Fig. 10. Emulación del ambiente marino

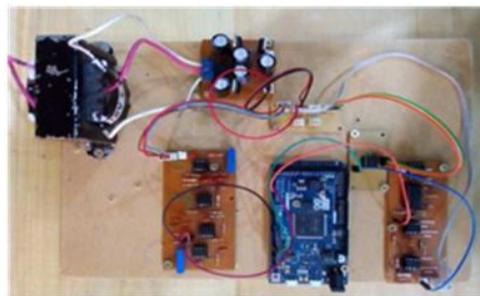


Fig. 11. Sistema generador de clicks

El detector de los clicks se muestra en la Fig. 12. Está compuesto por el extractor de envoltente, el umbral de decisión y la ventana temporal. El transmisor que emula al módem y el receptor que simula la estación de la costa se muestra en la Fig. 13

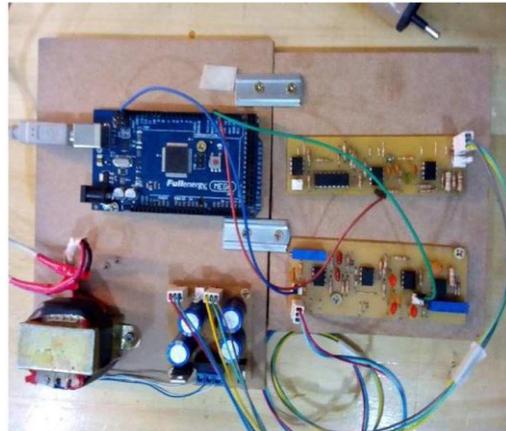


Fig. 12. Sistema receptor

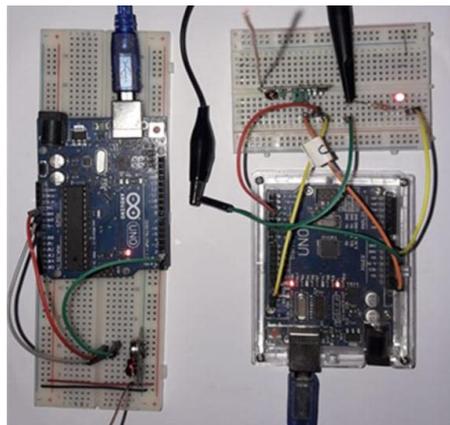


Fig. 13. Transmisor (boya) y receptor (costa)

Finalmente, la Fig. 14 muestra una vista superior de la pecera y los módulos citados anteriormente.

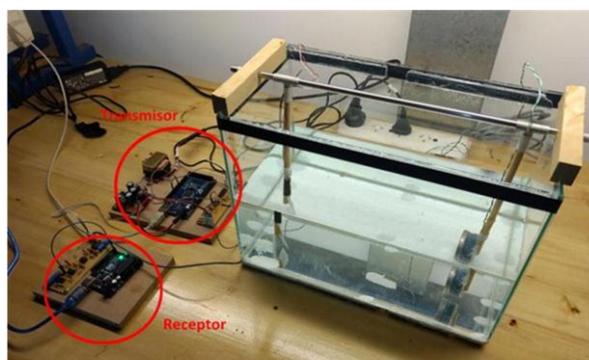


Fig. 14 Vista del sistema completo

6. RESULTADOS

A la hora de escribir este trabajo, se había verificado que las señales acústicas simuladas eran detectadas pero, existía un nivel de ruido de fondo superior al previsto. Esto se debió a que, por las dimensiones de la pecera, el frente de onda acústico viaja por el agua y por las paredes de la misma, ocasionándose interferencias y batidos.

7. CONCLUSIONES

En este trabajo se presentaron los estudios preliminares del desarrollo de un sistema orientado a la recepción, de señales generadas por cetáceos a fin de estudiar su actividad.

En primer lugar, se analizaron las características físicas del medio marino que influyen en la captación de las señales acústicas.

A continuación, se analizó una secuencia típica de emisión y se la analizó desde el punto de vista del espectro de densidad de potencia, verificando el ancho de banda previsto.

Teniendo en cuenta las limitaciones de la energía disponible en la boya, se optó por utilizar la técnica de umbral y ventana temporal para reconocer si la señal recibida es la esperada y proceder a grabarla para su posterior envío a la estación receptora en la costa. Finalmente, usando una pecera, se realizó una simulación que consistió en generar una secuencia similar a la emitida por un cetáceo, detectarla y transmitirla a un receptor que emuló a la estación receptora.

REFERENCIAS

- Kinsler L. E., Frey, A. B., Coppens, A. B., Sanders, J. V. *Fundamentals of Acoustics*, Fourth Edition, John Wiley & Sons, Inc, 1980.
- Medwin, H., Clay, C. S. *Fundamentals of Acoustical Oceanography*. Academic Press, 1998.
- Marino, A. *Detección de Clicks para Implementación de Monitoreo Acústico Pasivo de Delfines*. Tesis fin de carrera, Universidad Nacional de Tres de Febrero, 2017.
- Valese, L. N. *Diseño, Construcción y Caracterización de un Hidrófono Orientado a la Transducción de Señales Emitidas Por Cetáceos*. Tesis fin de carrera, Universidad Nacional de Tres de Febrero, 2017.
- Ruzzante, J. E., López Pumarega, M. I. *Emisión Acústica, un diálogo con los materiales*. [https://www.ciencias.org.ar > user > Ruzzante](https://www.ciencias.org.ar/user/Ruzzante)
- Veca, A. C., Accolti, E. *Ultrasonido para Ingenieros y Estudiantes de Ingeniería*. Primera edición, 2016. <http://www.fi.unsj.edu.ar/Ultrasonido>.

EVALUACIÓN DE DAÑO EN ROCA ANDESITA MEDIANTE ENERGÍA Y ENTROPÍA DE LA DESCOMPOSICIÓN EMD Y WAVELET EN SEÑALES DE EMISIÓN ACÚSTICA

Zitto M. E.^a, Sassano M. P.^{a,b}, Muszkats J. P.^{a,c}, Filipussi D. A.^{d,e} y Piotrkowski R.^{a,e}

^a Grupo de análisis de series temporales no estacionarias y no lineales,
Facultad de Ingeniería, Universidad de Buenos Aires, ARGENTINA.

^b Ingeniería de sonido, Universidad Nacional de Tres de Febrero, ARGENTINA

^c Universidad Nacional del Noroeste de la Provincia de Buenos Aires, ARGENTINA

^d Gerencia Desarrollos Tecnológicos y Proyectos Especiales, CNEA, ARGENTINA

^e Escuela de Ciencia y Tecnología, Universidad Nacional de San Martín, ARGENTINA

e-mail: series.nsnl@fi.uba.ar

RESUMEN

Para el análisis de series temporales no estacionarias y no lineales, como las obtenidas en ensayos de Emisión Acústica (EA), la Entropía de Shannon (ES) constituye una herramienta muy valiosa por su capacidad de detectar la aparición de fenómenos críticos, tales como la transición entre diferentes regímenes de daño. La ES es una combinación de la teoría de descomposición de las señales y la entropía estadística. Este concepto presenta las ventajas de la complejidad de la múltiple resolución aplicable al análisis de series temporales. En el presente trabajo se aplicaron estos métodos a la descomposición EMD de señales de EA obtenidas de ensayos de compresión uniaxial, en probetas cilíndricas de roca andesita llevadas a la rotura. Se aplicó a las señales la Transformada Wavelet (TW) y la Transformada de Hilbert-Huang (HHT) y se compararon los resultados.

Palabras Clave: Transformada de Hilbert-Huang, Transformada Wavelet, Entropía de Shannon, roca andesita, fractura.

1. INTRODUCCIÓN

La técnica de Emisión Acústica (EA) permite obtener información acerca de distintos procesos que ocurren en el interior de un material cuando es sometido a esfuerzos mediante el análisis de las ondas elásticas no estacionarias que se generan en el interior del mismo. En materiales frágiles como la roca se da un proceso de nucleación, crecimiento y coalescencia de microgrietas que lleva hasta la ruptura final del cuando se alcanza un nivel crítico de acumulación de energía (Lockner, 1993). La generación y propagación de ondas elásticas cubre distintas escalas espaciales y temporales que van desde el rompimiento de enlaces atómicos hasta las fallas sísmicas lo que hace que el estudio y análisis de la generación de fracturas en rocas sea un complemento importantísimo en sismología.

Las señales de EA generadas son de muy baja amplitud ($10 \mu V$) y de alta frecuencia (50 kHz a 1 MHz) y se caracteriza por eventos discretos con forma de pulsos oscilantes que

alcanzan una amplitud máxima en un tiempo de subida (Rise Time) de la señal y luego esta se amortigua en el tiempo (Grosse, 2008).

La técnica de EA proporciona un método para caracterizar los daños producidos en el material computando los parámetros característicos de la señal: energía, valor cuadrático medio (RMS), amplitud, *rise time*, duración del evento, etc. Debido a la similitud entre la EA y la sismología hay numerosos trabajos (Zhang, 2018; Carpinteri, 2009; Rao, 2005; Shiotani, 2001) que estudian el valor del b-value como resultado de la distribución de frecuencia acumulada de hits de EA en función de la amplitud de los mismos. Se comprueba que la relación en escala log-log es lineal y es conocida su aplicación en la sismica como ley de Gutenberg-Richter.

Bajo la hipótesis de que es posible asociar frecuencias características a los diferentes procesos de daño, los autores de este trabajo han realizado previamente estudios analizando las señales de EA y aplicando la Transformada Wavelet (TW) a señales de EA en probetas de Roca Andesita sometidas a compresión uniaxial. Por medio de la determinación de los máximos coeficientes de la TW y el mínimo de Entropía Wavelet (EW) se determinó una banda de frecuencia asociada a la propagación y avance de fracturas en el material (Muszkats, 2019; Sassano, 2017).

En este trabajo, continuación de los trabajos anteriores, se ha trabajado con una descomposición distinta a la de TW, la Descomposición Empírica en Modos (EMD por sus siglas en inglés) para determinar los modos característicos de las señales obtenidas y estudiar el comportamiento de la Entropía de Shannon en cada modo comparando la descomposición actual con los resultados obtenidos por TW.

2. DESARROLLO EXPERIMENTAL Y MÉTODOS DE ANÁLISIS

2.1 DESARROLLO EXPERIMENTAL

Siguiendo el trabajo de Filipussi, 2015, se ensayaron cuatro probetas cilíndricas de 75 mm de diámetro y 150 mm de largo, realizadas sobre testigos de andesita extraídos in situ de roca del Cerro Blanco, Pcia. San Juan, Argentina. Estas probetas fueron ensayadas a compresión simple uniaxial llevándolas a la rotura. Se utilizó una máquina marca CGTS de 100 toneladas de capacidad de tipo servo hidráulica y lazo cerrado donde se impuso una velocidad de desplazamiento de actuador de 0.12 mm/min. La Fig. 1 muestra el arreglo experimental de una probeta de andesita instrumentada con sensores de EA.

Se emplearon tres sensores piezoeléctricos para monitorear la EA. En la superficie de la probeta se colocaron dos sensores, uno sintonizado a 60 kHz y el segundo a 150 kHz. El restante, de banda ancha, fue adherido al plato de carga inferior teniendo en cuenta la propiedad de buena guía de onda del metal involucrado. El equipo de EA, ver Fig. 1, se completó con una placa de dos canales PCI-2 de PAC (*Physical Acoustic Corporation*) y se utilizó el software comercial *AEWIN* para el análisis y determinación de la mayoría de los parámetros característicos de las señales.

En este trabajo se analizaron las señales de la probeta 3 correspondientes al canal del sensor de banda ancha entre 100 KHz y 1 MHz para poder trabajar con las señales sin el filtrado proporcionado por los sensores resonantes. El ensayo duró aproximadamente 15 minutos y se obtuvieron 75385 *hits*, con una frecuencia de muestreo de $t_s = 1 \mu\text{seg}$.



Figura 1 Configuración experimental y equipo de EA.

2.2 METODOS DE ANÁLISIS

a) Transformada Wavelet

La TW (Bogges, 2009; Torrence, 1998), es un método ampliamente utilizado para el análisis de series temporales no estacionarias. Este método permite analizar los datos en un plano tiempo-frecuencia a partir de su descomposición tomando una base fija, a partir de una *wavelet madre*, con diferentes escalas y desplazamientos temporales. Este método supera en resolución tiempo-frecuencia al de la Transformada de Fourier ventaneada.

En este trabajo adoptamos la Transformada Wavelet Continua (TWC) que nos permite trabajar con bandas de frecuencia de ancho variable que definimos formalmente como

$$Wf(u, s) = \int_{-\infty}^{\infty} f(t) \psi_{u,s}^*(t) dt$$

donde $\psi_{u,s}(t)$ es la wavelet a escala s y desplazamiento temporal u .

$$\psi_{u,s}(t) = \frac{1}{\sqrt{s}} \psi\left(\frac{t-u}{s}\right), \text{ con } s > 0$$

Tomando determinados valores discretos de los parámetros u y s los coeficientes de $Wf(u, s)$ al cuadrado nos dan el contenido de potencia de la señal al tiempo $t_n = n t_s$ y la escala s la cual puede asociarse a una frecuencia.

En este trabajo utilizamos como wavelet madre la wavelet de Morlet compleja que permite una mejor captación del carácter oscilatorio de la señal.

b) Descomposición Empírica en Modos (EMD)

Al trabajar con una base a priori la TW no es la forma más versátil de analizar señales no lineales, pues al querer descomponer la serie temporal muchas veces se introducen artificios matemáticos para adaptar los datos a la base predeterminada.

A principios de siglo Norden Huang (Huang, 1998) desarrolló un método de análisis de series temporales donde propone descomponer localmente la serie con una base construida a partir de los datos que permite descomponer la serie en modos (funciones de modo intrínsecas *IMFs*) que deben cumplir dos condiciones: i) la cantidad de ceros y la cantidad de extremos deben ser iguales o a lo sumo diferir en uno, es decir que los modos son oscilaciones, y ii) el valor medio de la envolvente superior e inferior debe ser nulo en todo punto. Las *IMFs* obtenidas se ajustan mejor a los datos que la TW en series no lineales y no estacionarias. A las *IMFs* obtenidas por este método se les puede aplicar la Transformada de Hilbert y obtener frecuencias instantáneas asociadas a cada modo, al proceso completo de calcular las *IMFs* y aplicarle luego la Transformada de Hilbert se lo conoce como Transformada de Hilbert-Huang (HHT).

El procedimiento para la obtención de las *IMFs* consiste en determinar las envolventes superior e inferior de la serie a analizar, luego se calcula la media de las envolventes y se resta a la serie original. Si la función resultante cumple con las condiciones i) y ii) del párrafo anterior el resultado es la primer *IMF*, si no, se realiza nuevamente el proceso (que se denomina *sifting*). Una vez que el algoritmo finaliza se obtiene la primera función de modo intrínseco que corresponde al “detalle” más fino, es decir la mayor frecuencia. Luego se resta la función obtenida a los datos originales (primer residuo) y el proceso se realiza nuevamente obteniéndose los modos siguientes hasta que no sea posible extraer más oscilaciones, que es cuando el residuo correspondiente es una función monótona o tiene un solo extremo.

Así la descomposición de $x(t)$ resulta:

$$x(t) = \sum_{i=1}^N f_i(t) + r(t)$$

donde $r(t)$ es el residuo (tendencia de la serie), N es el número de modos y f_i son los modos correspondientes. Por definición, la Transformada de Hilbert de las f_i tienen

buen comportamiento por lo que es posible calcular las frecuencias instantáneas correspondientes a cada modo como función del tiempo (Huang, 2008).

c) Entropía de Shannon

La Entropía de Shannon (ES) es una medida del orden intrínseco de la señal (Shannon, 1948), y la presencia de mínimos sugiere un comportamiento más organizado, como por ejemplo una respuesta impulsiva, debida a avance abrupto de fracturas, a diferencia de fenómenos como fricciones, cierre de fracturas y ruido en general que pueden asociarse a valores altos de entropía (Piotrkowski, 2009).

Si tenemos los valores discretos de una señal $x(t)$ (finitos) tomados con un determinado t_s y los llamamos c_j , $j = 1, \dots, M$, podemos definir la energía de la señal en unidades arbitrarias (u.a.), dado que los modos son empíricamente ortogonales.

$$E = \sum_{j=1}^M (c_j)^2$$

Podemos definir la fracción de la energía correspondiente al tiempo $k = j \cdot t_s$ como

$$p_k = \frac{(c_k)^2}{E}$$

de aquí podemos definir la Entropía de Shannon de una señal $x(t)$ como

$$E = - \sum_{j=1}^M p_j \log(p_j)$$

3. RESULTADOS

a) Análisis con Transformada Wavelet Continua

En esta sección recopilamos algunos de los principales resultados presentados en Muszkats, 2019, para poder compararlos con la descomposición EMD. Siguiendo los resultados de algunos de los autores de este trabajo (Zitto, 2015; Sagasta, 2018) es posible asignar determinadas bandas de frecuencias a los distintos procesos que conducen hasta la rotura final en materiales frágiles. Para determinar la banda de frecuencias asociadas al daño incipiente debido a las fracturas utilizamos la TWC que nos permite filtrar los hits alrededor de una determinada frecuencia. Al comienzo del ensayo, el daño consiste en una gran cantidad de pequeñas grietas, luego la coalescencia de estas micro grietas da como resultado grietas mayores de avance rápido peligroso, y finalmente nuevas micro grietas emergen de las macro grietas y todo el proceso se repite hasta que se produce el colapso final.

Como el t_s tomado en los tests de EA es de $1 \mu\text{seg}$ la mayor frecuencia que podemos obtener es de 500 KHz, por lo que nuestro estudio se concentró en las frecuencias que van de 100 KHz a 500 KHz. Calculando la TWC de todos los hits correspondientes al

ensayo y graficando para las frecuencia (o escala) donde ocurren los máximos de estos coeficientes para cada hit se observa que a una frecuencia de alrededor de 240 KHz al principio del ensayo los máximos ocurren en pocos hits aumentando la ocurrencia de máximos a partir de los 4 minutos del ensayo donde empiezan a aparecer las fracturas en la probeta. Para las otras frecuencias hay muy pocos coeficientes máximos o bien aparecen con igual densidad durante todo el ensayo. Por lo tanto en el mencionado trabajo concluimos que podríamos asignarle la banda de frecuencias de 240 KHz al daño debido a las macro fracturas en la probeta.

Para poder comparar los resultados y las diferencias en la información que nos da la CWT y la descomposición EMD estudiamos la evolución de la energía de EA acumulada y la de cada banda de frecuencia al aplicarle la TWC (Fig. 2). En los gráficos se observa que las energías de cada banda siguen la forma de la de EA pero no explican toda la energía del hit. Además la banda con mayor contenido de energía es la correspondiente a una frecuencia de 121 KHz.

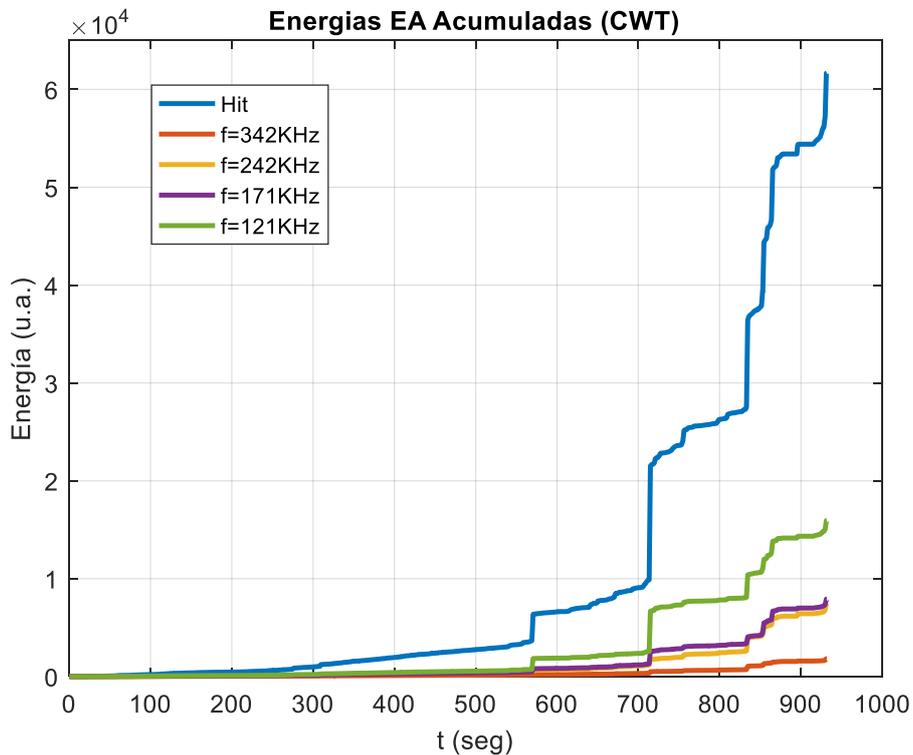


Figura 2: Evolución de la energía de EA acumulada y la energía acumulada correspondiente a la descomposición con TWC.

b) Análisis con Descomposición Empírica en Modos

Se realizó la EMD de todos los hits del ensayo y se calculó la frecuencia instantánea para cada hit como función del tiempo para asociar los distintos modos en la descomposición a distintos mecanismos que generan la EA. En la Fig. 3 se grafican 3 hits característicos, con las primeras 3 IMFs (se obtuvieron 5, 7 y 6 modos más el residuo respectivamente) ya que los demás modos tienen amplitud mucho menor que

la señal. De los gráficos se observa que el modo 1 tiene una amplitud similar al hit completo mientras que para el segundo modo la amplitud es un 25% de la amplitud del primer modo y va decreciendo la amplitud en los modos sucesivos.

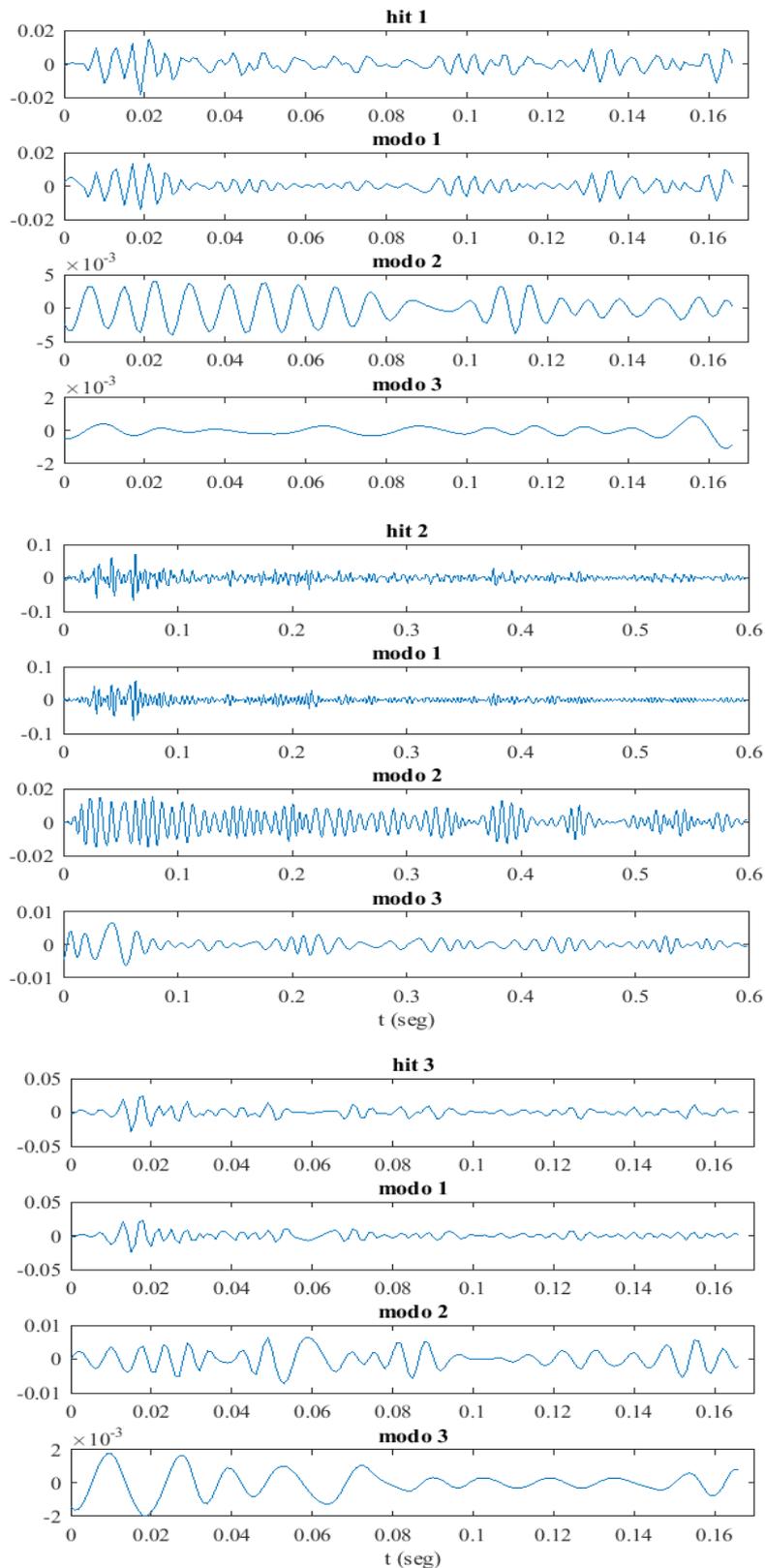


Figura 3: Tres hits característicos, con sus correspondientes tres primeros modos de la descomposición EMD.

Del cálculo de las frecuencias instantáneas para todos los hits pudimos observar que los únicos modos cuyas frecuencias están dentro del rango del sensor son los modos 1 y 2. El modo 1 de los hits tienen frecuencias instantáneas en general entre 200 y 300 KHz y su amplitud es apreciable en un corto intervalo de tiempo, lo que nos está indicando que la componente de esa frecuencia es impulsiva. Para el modo 2 las frecuencias se encuentran en general por debajo de 170 KHz y su amplitud se extiende a lo largo de todo el hit. En la Fig. 4 se grafican las frecuencias instantáneas de los mismos hits graficados en la Fig. 3. Estos resultados sugieren que podemos asociar el modo 1 de la descomposición con las macro fracturas y propagación rápida de las mismas, resultado que concuerda con el obtenido en el análisis con CWT, mientras que los otros modos están asociados a otros mecanismos como fricción, ruido, etc.

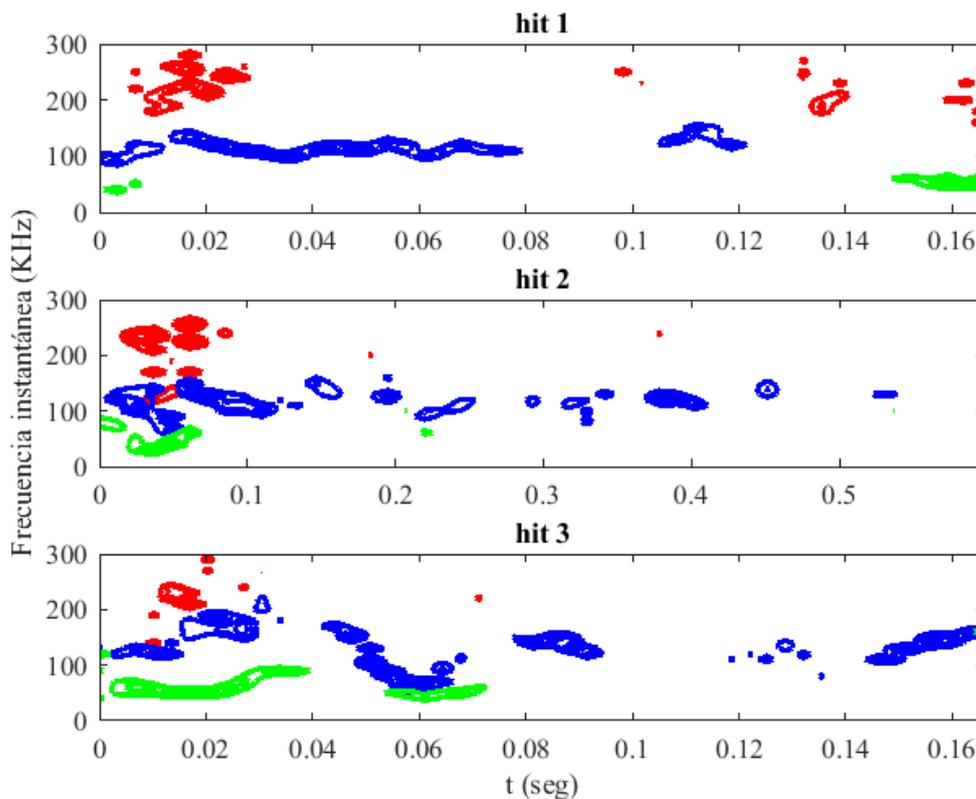


Figura 4: frecuencia instantánea para los hits de la figura 3. Rojo-modo1, azul-modo2 y verde-modo3.

Posteriormente calculamos la energía acumulada para cada modo comparándola con la energía de EA (Fig. 5). Podemos apreciar que el modo 1 contiene aproximadamente el 90% de la energía de EA y que del modo 3 en adelante las energías son despreciables comparándolas con las energías de los hits. Hacemos notar que a diferencia del análisis con la TWC el modo 1 de frecuencias instantáneas entre 200 y 300 KHz contiene casi toda la energía, mientras que el filtrado con transformada wavelet en la banda de 240 KHz su energía es mucho menor a la de los hits. Esto es debido a que en la descomposición EMD se tiene en cuenta la no linealidad de la señal debido a su base adaptativa y por lo tanto podemos estudiar el daño por fracturas en el material asociándolo directamente con el modo 1 en la descomposición.

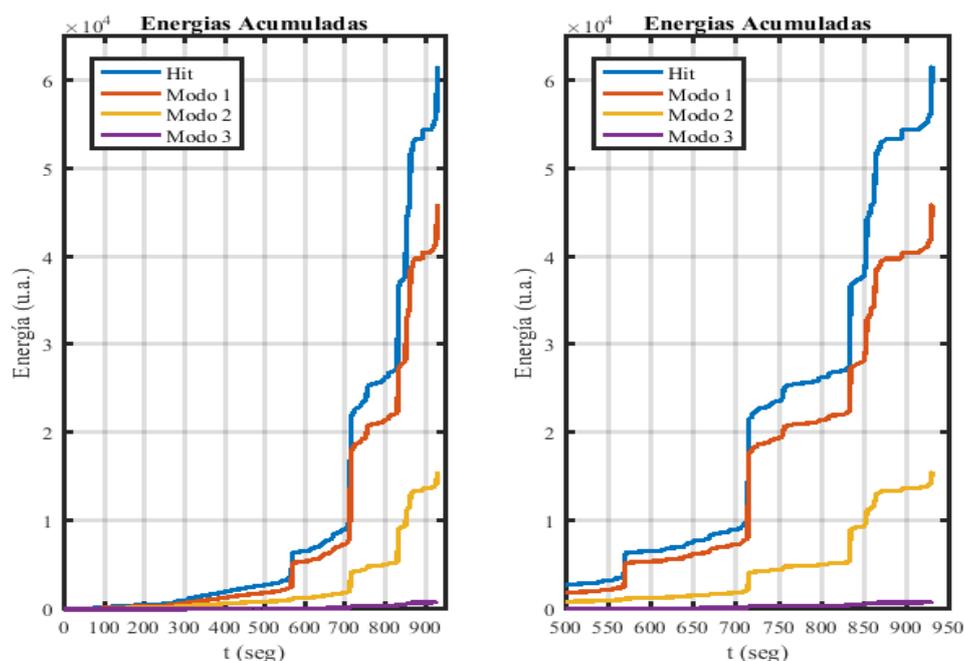


Figura 5: Energías acumuladas de EA (hit) y de los 3 primeros modos en la descomposición EMD durante todos el ensayo (izquierda) y en la última mitad del ensayo (derecha).

c) Entropía de Shannon

Finalmente calculamos la ES para todos los hits estudiando su evolución a lo largo de todo el ensayo. Como la entropía es muy variable de hit a hit suavizamos con una media móvil sobre 700 hits. En la Fig. 6 se observa la ES de los modos 1 y 2 suavizada y comparamos con la energía acumulada de EA. En el gráfico se observa que los modos 1 y 2 tienen forma muy similar para la entropía. En los saltos de energía acumulada, donde se produce el mayor daño debido a macro fracturas ocurre un fuerte incremento en la ES de los dos modos, por lo que los mínimos en la entropía media indican un precursor del daño catastrófico.

4. CONCLUSIONES

Se analizaron con transformada wavelet, descomposición empírica en modos y entropía de Shannon las señales de emisión acústica de roca andesita en un ensayo de compresión uniaxial.

Se pudo adjudicar con ambos métodos de análisis la frecuencia de alrededor de 240 KHz a los mecanismos de formación y avance rápido de macro fracturas. Sin embargo, la energía disipada en esa banda no se pudo determinar cuantitativamente con la transformada wavelet. En ese sentido la descomposición empírica en modos demostró su potencial para el análisis de señales provenientes de procesos no estacionarios y no lineales.

La comparación de la entropía y la energía a lo largo del ensayo para las componentes significativas de descomposición empírica en modos mostró que los valores mínimos de entropía son precursores de saltos abruptos de energía y por ende de macro fracturas.

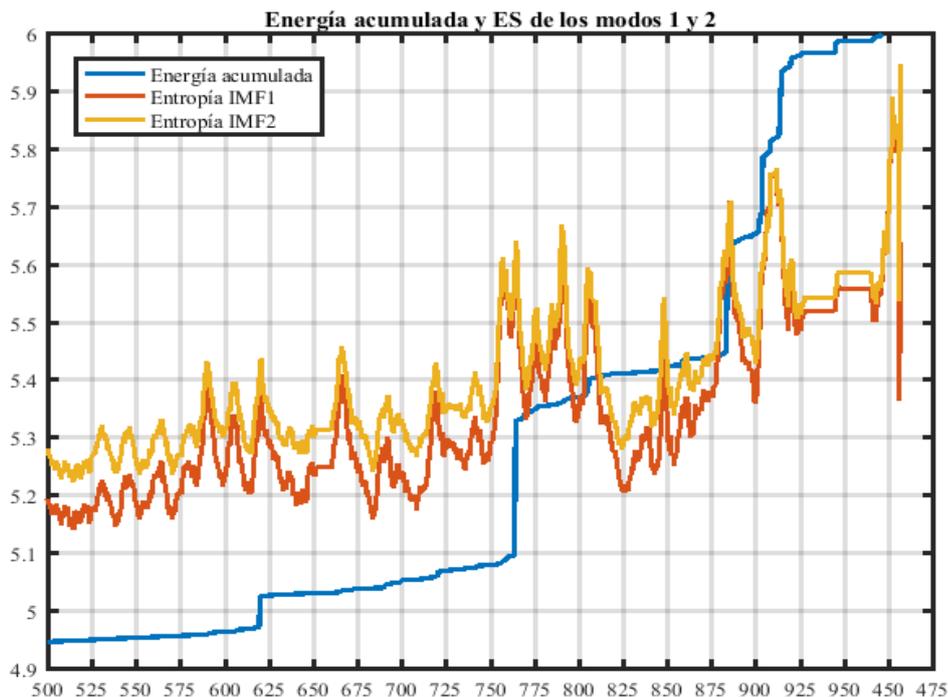


Figura 6: Energía de EA y ES de los modos 1 y 2 suavizada. La energía acumulada se presenta con cambio de escala para su comparación con las entropías.

REFERENCIAS

Bogges A. and Narcowich F.J., *A First Course in Wavelets with Fourier Analysis* (second Edition). John Wiley & Sons; 2009; ISBN 9780470431177.

Carpinteri, A., Lacidogna, G., y Puzzi, S., *From criticality to final collapse: Evolution of the “b-value” from 1.5 to 1.0*. *Chaos, Solitons and Fractals*; 2009; 41(2), 843– 853.
<https://doi.org/10.1016/j.chaos.2008.04.010>

Filipussi, D. A., Guzmán, C. A., Xargay, H. D., Hucauluk, C., y Torres, D. N., *Study of Acoustic Emission in a Compression Test of Andesite Rock*. *Procedia Materials Science*; 2015; 9, 292– 297.
<https://doi.org/10.1016/J.MSPRO.2015.04.037>

Grosse C. and Ohtsu M., editors. *Acoustic Emission Testing*. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg; 2008; ISBN 978-3-540-69895-1.

Huang, N. E.; Shen, Z.; Long, S. R.; Wu, M. C.; Shih, H. H.; Zheng, Q.; Yen, N. C.; Tung, C. C.; Liu, H. H., (1998). *“The Empirical Mode Decomposition and the Hilbert Spectrum for Nonlinear and Nonstationary Time Series Analysis”*. *Proceedings of the Royal Society of London A*; 1998; **454** (1971): 903–995.

Huang, N. E., and Wu, Z., *A review on Hilbert-Huang transform: Method and its applications to geophysical studies*, *Rev. Geophys.*; 2008; 46, RG2006.
doi:[10.1029/2007RG000228](https://doi.org/10.1029/2007RG000228).

Lockner, D., *The role of acoustic emission in the study of rock fracture*. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*; 1993; 30 (7), 883–899.

Muszkats J., Filipussi D., Zitto M., Sassano M., and Piotrkowski R., *Detection of fracture regimes in andesite rock via the energy evolution of acoustic emission signals in relevant frequency bands*. In *Actas del VII Congreso de Matemática Aplicada, Computacional e Industrial (MACI)* (in press). 2019.

Rao, M. V. M. S., y Prasanna Lakshmi, K. J., *Analysis of b-value and improved b value of acoustic emissions accompanying rock fracture*. *Current Science*; 2005; 89(9), 1577–1582.
<https://doi.org/10.2307/24110936>

Sagasta F. Zitto M.E. Piotrkowski R. Benavent-Climent A. Suarez E. y Gallego A., *Acoustic emission energy b-value for local damage evaluation in reinforced concrete structures subjected to seismic loadings*, *Mechanical Systems and Signal Processing*; 2018; 102, pp. 262–277.

Sassano M., Zitto M., and Piotrkowski R., *Shannon wavelet entropy and acoustic emission applied to assess damage in concrete in dynamical tests* (abstract). *Mecánica Computacional*, XXXV; 2017; 2563–2563. ISSN 2591-3522.

Shannon C.E., *A mathematical theory of communication*, *Bell system technical journal*; 1948; 27 (3), 379-423.

Shiotani, T., Yuyama, S., Li, Z. W., y Ohtsu, M., *Application of AE improved b value to quantitative evaluation of fracture process in concrete materials*. *Journal of Acoustic Emission*; 2001; 19, 118–133.

Torrence C. and Compo G. A., *Practical Guide to Wavelet Analysis*. *Bulletin of the American Meteorological Society*; 1998; 79(1):61–78. ISSN 00030007.

Zhang, J., *Investigation of Relation between Fracture Scale and Acoustic Emission Time-Frequency Parameters in Rocks*. *Shock and Vibration*; 2018; 1–14.
<https://doi.org/10.1155/2018/3057628>

Zitto M.E., Piotrkowski R. Gallego A. Sagasta F. y Benavent-Climent A., *Damage assessed by Wavelet scale bands and b-value in dynamical tests of a reinforced concrete slab monitored with acoustic emission*, *Mechanical Systems and Signal Processing*; 2015; 60-61, pp 75-89.

LA EMISIÓN ACÚSTICA, SU HISTORIA EN LA ARGENTINA

López Pumarega M. I.^{a, b}, Ruzzante J. E.^{b, c, d}, Gómez M. P.^{b, c, e}

^a *Proyecto Centro Internacional para Estudios de la Tierra (ICES), Comisión Nacional de Energía Atómica y Universidad Nacional de Cuyo, Mendoza, Argentina.*

^b *Grupo Latinoamericano de Emisión Acústica GLEA.*

^c *Fac. Reg. Delta, Universidad Tecnológica Nacional, Campana, Buenos Aires, Argentina.*

^d *Universidad Tres de Febrero, Caseros, Buenos Aires, Argentina.*

^e *Dpto. ICES y Ondas Elásticas, Gerencia de Área Investigaciones y Aplicaciones No Nucleares, Comisión Nacional de Energía Atómica, Centro Atómico Constituyentes, San Martín, Buenos Aires, Argentina.*

e-mail: ilopezpumarega@gmail.com

La Emisión Acústica (EA) es un método de Ensayo No Destructivo (END) que es ampliamente utilizado para estudios e investigaciones en ciencias de los materiales. Los inicios de esta técnica en el mundo se remontan al siglo XX con Kishinoue en la década del 30 en Japón y a Obert en Estados Unidos de América en la década del 40, pero como referencia científica fundacional del tema, se puede mencionar la Tesis Doctoral de Joseph Kaiser en Alemania en 1950. Kaiser abordó el problema concreto de las ondas elásticas producidas por los metales durante su deformación y lo estudió a partir de registrarlas mediante instrumentación electrónica. Con el avance tecnológico de las últimas décadas, los equipos y sistemas de EA han alcanzado altos desempeños y bajos costos en relación a sus antecesores, permitiendo ampliar y diversificar sus posibilidades de aplicación. Actualmente la EA es utilizada en ensayos industriales para evaluar la integridad de grandes estructuras y componentes, y también en una amplia variedad de líneas de investigación en materiales, como metales, plásticos, concreto, rocas, maderas, compuestos, etc. En este trabajo se resumen las actividades de la EA en la Argentina desde sus orígenes en la década del 60, hasta nuestros días, incorporando una breve reseña de los avances en su Normalización a nivel nacional (IRAM), regional (MERCOSUR) e internacional (ISO). Se presentan también la creación del Grupo Latinoamericano de Emisión Acústica (GLEA) en 1997 y una breve reseña histórica desde 1999 de los Encuentros científico-tecnológicos llamados E-GLEA.

Palabras Clave: Emisión Acústica, GLEA, Normalización, Argentina.

1. INTRODUCCIÓN

La detección temprana de daño en los materiales de componentes y estructuras industriales, es un tema de enorme importancia económica y de seguridad ambiental, ya que permite disminuir los costos de fabricación y mantenimiento, y los riesgos para los trabajadores y para el público en general. En ese sentido, la Emisión Acústica (EA), que forma parte de los Ensayos No Destructivos (END), es una herramienta fundamental. Las técnicas de END, y en particular la EA, son valiosas para la caracterización de materiales y la identificación y cuantificación de los distintos procesos físico-químicos que ocurren en los mismos. La particularidad de la EA es su capacidad para detectar “on line” las modificaciones en el estado de tensiones de los materiales y por ende detectar la aparición de procesos de falla incipientes, posibles precursores de cambios catastróficos aún en

regiones alejadas de una estructura. Incluso la técnica se utiliza desde hace unos 30 años en minas y en el estudio de la corteza terrestre, apuntando a la predicción de sismos y erupciones volcánicas.

La EA, que es el nombre tanto del proceso como de la técnica, está constituida por ondas elásticas generadas por la redistribución repentina del campo de tensión-deformación en materiales o estructuras sometidos a carga externa. La EA es un fenómeno dinámico. Ocurre en el inicio o crecimiento de fisuras, en apertura y cierre de fracturas, deformación, movimiento de dislocaciones, formación de cavidades, corrosión, rotura de ligaduras en materiales compuestos, etc. Estas ondas se propagan a través del material y eventualmente llegan a la superficie donde producen pequeños desplazamientos temporarios. Son ondas de baja amplitud y alta frecuencia, normalmente ultrasónicas. Por esta razón, se requiere para su detección transductores piezoeléctricos muy sensibles. Las fuentes de EA están generalmente relacionadas con “daño”. Por ello, la detección y el análisis puede ser usado para evaluar el comportamiento dinámico del material bajo condiciones de carga y de este modo predecir su falla.

La diferencia principal con otros métodos de END tales como Rayos X, Ultrasonido, etc., es su capacidad de detectar cambios en tiempo real. De este modo, usando un sistema de EA, podemos monitorear “in situ” el comienzo y el desarrollo de daño en el material o la estructura, aun cuando ello no sea posible por medio de la inspección visual.

2. ORÍGENES DEL MÉTODO DE EA

Históricamente los antecedentes del uso de la EA se remontan a tiempos muy remotos, ya que seguramente pudo ser escuchada en forma directa en diversos fenómenos naturales como, por ejemplo, en los movimientos sísmicos, el congelamiento del agua al formarse hielo, la fractura de rocas y árboles, etc. Es posible, según los antropólogos, que los primeros alfareros que horneaban cerámicas, también percibieran los sonidos emitidos durante el enfriamiento de las mismas, para evaluar el proceso. También, al alcanzar el grado de pureza necesario del estaño, se podrían haber producido las primeras experiencias del “grito del estaño”, sonido audible que se genera cuando se provoca deformación plástica por maclado, ya que las piezas más antiguas conocidas de ese metal puro, datan del año 2650 a.C. En la edad media ya se había documentado la existencia de ruidos originados cuando un acero es templado, detectándose con esos sonidos la transformación martensítica. (Drouillard, 1996). Históricamente la EA ya figura en textos escritos durante el siglo IIX en el actual Irak, tal como lo cita Ruzzante J. et al (2016), relacionada con el sonido producido al deformar el estaño, y en Latinoamérica en el siglo XVII, referido al enfriamiento del hierro.

En las ciencias médicas, también los sonidos que produce el cuerpo humano han contribuido ampliamente para el estudio de la salud y la enfermedad, primero en forma directa con el oído del médico y luego mediante el invento del estetoscopio (Palacios T., 2001). También hay antecedentes históricos del uso de dispositivos similares por Leonardo da Vinci para detectar barcos cercanos a la costa. Hasta acá se está considerando la EA como un fenómeno ondulatorio en la parte audible del espectro de frecuencias.

En la primera mitad del siglo XX, hay documentos que muestran primeros estudios sistemáticos basados en la medición de la producción de ondas elásticas, como por ejemplo en Japón, adonde Kishinoue estudió la fractura de una varilla de madera sometida a una tensión flexural, utilizando como transductor (sensor) una cápsula de fonógrafo.

En los Estados Unidos de América, Robert J. Anderson en 1925, informo en su Tesis que, durante los ensayos de tracción de una aleación de aluminio, entre el punto de fluencia y cerca de la carga de rotura, los incrementos de carga producían una serie de

deslizamientos que daban lugar a una serie de líneas aserradas o bandas de Lüders, que eran acompañados por una serie de "clics o sonidos audibles" que dependían del espesor de la chapa, siendo más agudos para una chapa delgada. Se observa así, cómo a lo largo del tiempo se amplió el conjunto de materiales donde se detectaba el fenómeno de la EA. (Drouillard, 1996).

La etapa científico-tecnológica de la EA se inicia en Alemania durante 1950 con la primera Tesis Doctoral de Joseph Kaiser (1950): "Estudio del Fenómeno Acústico en los Ensayos de Tracción", en la Universidad Técnica de Múnich, relacionada con el comportamiento de los metales ante la tracción.

Luego el método y las técnicas de aplicación de la EA han evolucionado rápidamente, y hasta la actualidad se han publicado miles de trabajos.

3. LA EA EN LA ARGENTINA

En el Centro Atómico Bariloche de la Comisión Nacional de Energía Atómica (CNEA), el Dr. Roberto Pascual durante el año 1971 inició las actividades de EA en Argentina. Entre ese año y 1980 se realizaron trabajos de investigación en diversas aleaciones de cobre y de aluminio que produjeron varias publicaciones y una Tesis de Doctorado. Luego se formó otro Grupo en la Universidad de Córdoba, que también realizó publicaciones y una Tesis de Doctorado (Palacios T., 2001).

En el Centro Atómico Constituyentes de la CNEA, en 1979 el Dr. José. Ruzzante formalizó las actividades de un Grupo de Trabajo dedicado íntegramente a la investigación científico-tecnológica y la promoción de desarrollos en EA. Dicho grupo continúa en la actualidad dirigido por el Dr. Martín Gómez, habiéndose publicado numerosos trabajos científico-tecnológicos y Tesis de Grado, Maestría y Doctorado. Sus áreas de trabajo relacionadas con la EA y las ondas elásticas, se aplican en varios temas diferentes: metales, plásticos, cementos, materiales compuestos, concreto, materiales odontológicos, rocas, ciencias de la tierra, emisión magneto acústica, adherencia de recubrimientos ("scratch test") y aplicaciones en geofísica. Se realizan también desarrollos tecnológicos de equipos especiales.

Asimismo, se formó otro Grupo relacionado con las aplicaciones de la EA en el Instituto de Matemática, Astronomía y Física, I.M.A.F. de la Universidad Nacional de Córdoba y otro en la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Buenos Aires. En ambos casos hubo varias publicaciones internacionales y Tesis de Doctorado (Palacios T., 2001).

En 1997 comenzaron los trabajos en el Instituto de Materiales y Suelos de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional de San Juan de la mano del Ing. M. A. Sabio Montero. En ese mismo año, el Dr. Horacio Lescano incluye la EA entre las tareas del grupo de Vibraciones mecánicas (GVM) de la Facultad Regional Delta de la Universidad Tecnológica Nacional, a partir del cual se nuclea el Grupo de Emisión Acústica (GEA) que actualmente dirige el Dr. Martín Gómez.

En el ámbito científico académico existen otros Grupos que trabajan o han trabajado en los últimos 15 años en investigación y desarrollo en EA, o que la aplican como método de evaluación en diversos procesos: Entre estos se pueden mencionar los Grupos de Daño por Hidrogeno y de Corrosión, ambos de la Gerencia de Materiales de la CNEA; el Grupo de Materiales Compuestos del ITPN (CONICET-FI UBA), la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional de Río Cuarto, provincia de Córdoba; la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional de Misiones UNaM en Oberá, Misiones; en la Carrera de Ingeniería en Sonido, Universidad Nacional de Tres de Febrero UNTREF, en Caseros, Buenos Aires; y el DME-FAIN de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional del Comahue en Neuquén, donde se realiza este E-GLEA 10.

4. LA COMUNIDAD DE EA EN EL MUNDO

Pocos años después del inicio de los estudios e investigaciones de la nueva técnica de EA, sus especialistas, técnicos y usuarios, comenzaron a organizarse en varias partes del mundo. Así en EEUU se creó en 1967, el “Acoustic Emission Working Group, AEWG”, para centralizar la información, compatibilizar la terminología y las técnicas experimentales, y compilar e intercambiar experiencias. Su primer Encuentro fue en 1968. En Japón comenzó a reunirse en 1969 el “Japanese Committee on Acoustic Emission (JCAE)”. Por otro lado, Europa comenzó la organización de la comunidad usuaria de la EA en 1972, con la “Physics Conference on Acoustic Emission” en Londres, allí se creó el “European Working Group on Acoustic Emission, EWGAE” (Ruzzante J. et al, 2016).

En Asia el primer grupo de trabajo nacional en EA fue el de la India, creado en 1985. El grupo nacional de Sud África denominado "South African Working Group for Acoustic Emission" se creó en 1989. En Corea se creó en 1990 el "Korean Working Group on Acoustic Emission, KWGAE" (Palacios T., 2001).

Todos estos Grupos periódicamente organizan Congresos Internacionales donde se presentan los últimos trabajos de investigación, desarrollo y aplicaciones de la EA.

5. LA COMUNIDAD DE EA EN LATINOAMÉRICA

En Argentina, con la necesidad de vincular a los especialistas, técnicos y usuarios relacionados con la EA, el 4 de abril de 1997, se creó en la CNEA el **Grupo Latinoamericano de Emisión Acústica, GLEA**. Los miembros fundadores por Argentina son: Dr. J. E. Ruzzante (CNEA), Dra. M. I. López Pumarega (CNEA), Téc. M. Armeite (CNEA), Dr. C. E. D'Attellis (CNEA), Ing. T. A. Palacios (CNEA); Dra. R. Piotrkowski (Universidad Nacional de San Martín); Ing. M. A. Sabio Montero (Universidad Nacional de San Juan), y el Ing. P. Feres Filho de Brasil (López Pumarega M. I. et al., 2002; Ruzzante J. et al, 2004).



Figura 1. Miembros Fundadores del GLEA: R. Piotrkowski, T. Palacios, J. E. Ruzzante, M. I. López Pumarega, M. Armeite, P. Feres Filho, M. A. Sabio Montero.

Los objetivos del GLEA son puramente científicos y tecnológicos: promover, desarrollar, investigar, realizar reuniones, en temas de EA, y fomentar la incorporación de nuevos adherentes interesados en estos temas. La participación en el GLEA es absolutamente gratuita.

El GLEA dispone de una página web y un correo electrónico (<https://www.cnea.gov.ar/cac/glea/>). En la Fig. 1, se puede ver una fotografía de los miembros fundadores del GLEA. Con posterioridad se fueron incorporando más de 200 especialistas, técnicos y usuarios de Sudamérica y de España.

5.1. ENCUNTROS E-GLEA

Para promover las actividades y generar un espacio de discusión de temas, desde 1999, y cada dos años, el GLEA organiza Encuentros Internacionales, denominado E-GLEA, ya habiéndose realizado 9 ediciones del mismo. El primero de estos Encuentros, el E-GLEA 1, se realizó en el Centro Atómico Constituyentes de la CNEA, en Buenos Aires, del 10 al 14 de septiembre de 1999. En esa ocasión se invitó al especialista Prof. Dr. Kanji Ono, de la Universidad de California, EEUU, uno de los más reconocidos investigadores en EA, creador y editor de la revista especializada “Journal of Acoustic Emission”. A través de esa publicación se difundieron las actividades realizadas durante el E-GLEA 1 a la comunidad internacional (ver Fig.2).

Los E-GLEA son un ámbito de encuentro, discusión y difusión de los nuevos trabajos de investigación y aplicaciones de la EA. Año por medio, se fueron realizando los distintos Encuentros internacionales del GLEA de acuerdo con el siguiente resumen:

- E-GLEA 1: Buenos Aires, Argentina, 6-10 de septiembre de 1999.
- E-GLEA 2: Buenos Aires, Argentina, 10-14 de septiembre de 2001.
- E-GLEA 3: Río de Janeiro, Brasil, 2-6 de junio de 2003.
- E-GLEA 4: Taormina, Italia, 16 al 19 de octubre de 2005.
- E-GLEA 5: Universidad Nacional de Misiones, Oberá, Misiones, Argentina, durante este Encuentro se celebraron los 10 años del GLEA, 29 de agosto al 1 de septiembre de 2007.
- E-GLEA 6: Universidade de Rio Grande Do Sul, Porto Alegre, Brasil, 16 de septiembre de 2009.
- E-GLEA 7: Universidad Tecnológica Nacional, Regional Mendoza, Mendoza, Argentina, 25-27 de agosto de 2011.
- E-GLEA 8: Universidad Nacional de Tres de Febrero, UNTREF, Caseros, Buenos Aires, Argentina, 10-12 de septiembre de 2013.
- E-GLEA 9: Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de Misiones, Oberá, Misiones, Argentina, celebrándose los 20 años del GLEA, del 29 al 31 de agosto de 2017.
- E-GLEA 10: Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional del Comahue, Neuquén, Provincia de Neuquén, Argentina 14 al 16 de agosto de 2019, donde se presenta este trabajo.

Como se puede ver, en 6 ocasiones se pudieron privilegiar como lugares de realización de los Encuentros, los ámbitos universitarios afines a la EA, pudiéndose así fomentar la participación de los estudiantes. En todos los E-GLEA participaron en promedio más de 60 especialistas, investigadores, técnicos y usuarios de la EA.

Desde sus inicios, los Encuentros contaron con la colaboración de varias instituciones extranjeras y argentinas, incluida la Agencia Nacional de Promoción Científica y

Tecnológica a través del Fondo para la Investigación Científica y Tecnológica (FONCYT) y sus subsidios para Reuniones Científicas.

En las Fig. 2 a 4 y 7 a 12, se muestran fotografías de los participantes en los encuentros E-GLEA. Las fotos de la Figuras 5 y 6 se insertan en orden cronológico a las antes mencionadas y corresponden a unas Jornadas de Emisión Acústica y Estructuras Geofísicas, auspiciadas por el GLEA, la primera en San Juan, Argentina en 2003 y la siguiente en Malargüe, Mendoza, Argentina, en 2004. En esas reuniones comenzaron a sentarse las bases de lo que luego sería el “International Center of Earth Sciences” (ICES) fundado entre la CNEA y la Universidad Nacional de Cuyo, en conjunto con investigadores del Consiglio Nazionale delle Ricerche (CNR) e importantes instituciones científicas de Italia.

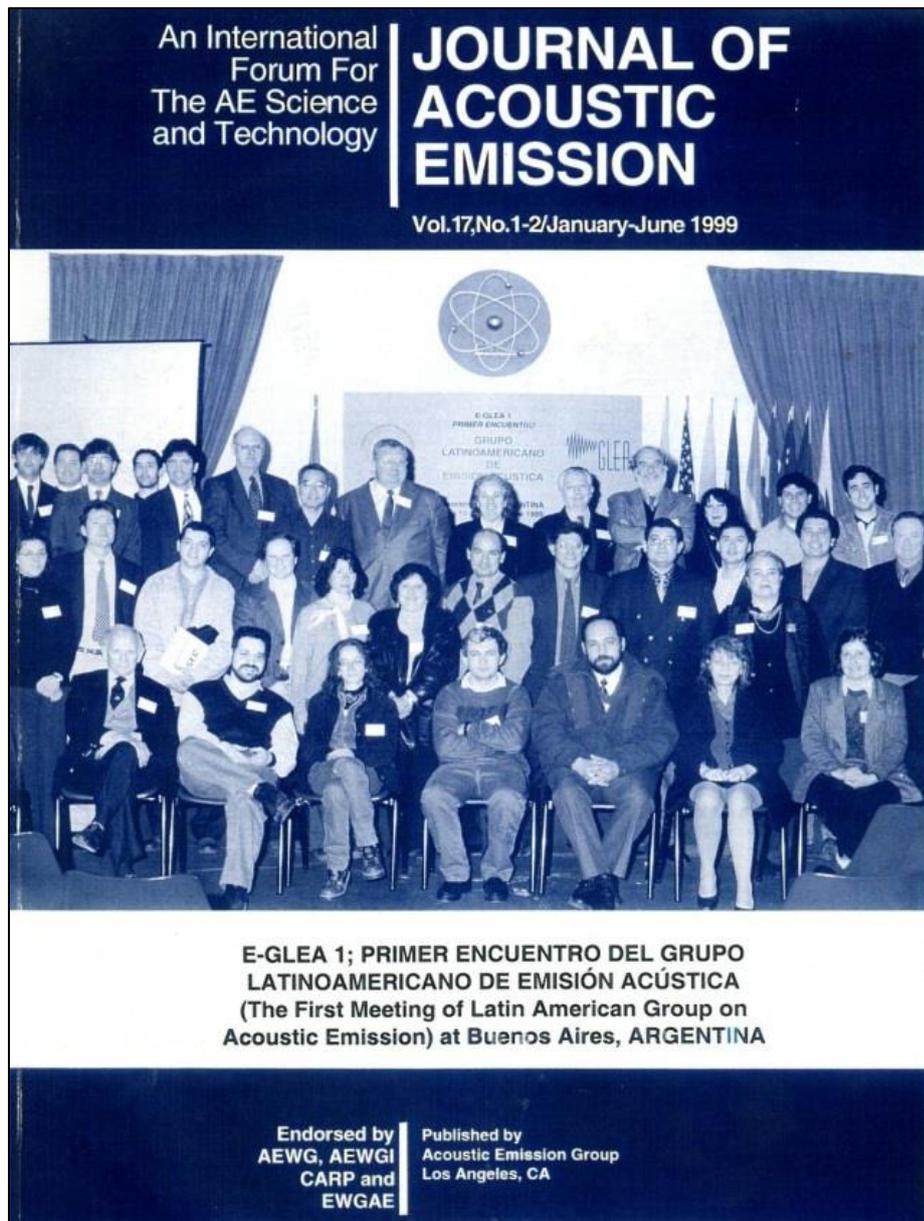


Figura 2. E-GLEA 1, Portada de la revista “Journal of Acoustic Emission, Vol. 17, No. 1-2/January-June 1999”, gentileza Prof. Dr. Kanji. Ono, Centro Atómico Constituyentes, Buenos Aires, Argentina, 6-10 de septiembre de 1999.



Figura 3. E-GLEA 2, Centro Atómico Constituyentes, Buenos Aires, Argentina, 10-14 de septiembre de 2001.



Figura 6. 1^{as}. Jornadas de Emisión Acústica y Estructuras Geofísicas, Malargüe, Mendoza, Argentina, 20-21 de diciembre de 2004.



Figura 4. E-GLEA 3, en el marco del "3rd. Pan-American Conference for Nondestructive Testing (3 PANNDT)", Río de Janeiro, Brasil, 2-6 de junio de 2003.



Figura 7. E-GLEA 4, Taormina, Italia, 16-19 de octubre de 2005.



Figura 5. Jornada sobre Emisión Acústica en Estructuras (Geofísicas y de Ingeniería Civil), Instituto Nacional de Prevención Sísmica INPRES, San Juan, Argentina, 5 de diciembre de 2003.



Figura 8. E-GLEA 5 y Celebración de los 10 años del GLEA. Universidad Nacional de Misiones, Oberá, Misiones, Argentina, 29 de agosto al 1 de septiembre de 2007.



Figura 9. E-GLEA 6, Universidad Federal de Rio Grande do Sul (UFRGS), Porto Alegre, Brasil, 16 de septiembre de 2009.



Figura 10. E-GLEA 7, Facultad Regional Mendoza, Universidad Tecnológica Nacional, Mendoza, Argentina, 25-27 de agosto, 2011.



Figura 11. E-GLEA 8, Universidad Nacional de Tras de Febrero UNTREF, Caseros, Buenos Aires, Argentina, 10-12 de septiembre de 2013.



Figura 12. E-GLEA 9 y Celebración de los 20 años del GLEA, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de Misiones, Oberá, Misiones, 29 al 31 de agosto de 2017.

6. LA NORMALIZACIÓN EN EA

Desde hace más de 30 años, en la Argentina existen varias empresas, subsidiarias de otras extranjeras y también algunas nacionales, que realizan ensayos de EA en el ámbito industrial e inclusive algunas que diseñan y fabrican equipos especiales.

A medida que avanzaban el uso y las aplicaciones de la EA en Argentina y con el fin de obtener un nivel de ordenamiento tecnológico mínimo, fue necesario poder crear disposiciones, protocolos o documentos específicos. Así surgió la necesidad de comenzar a trabajar en la “Normalización” de las actividades de EA.

Una Norma es un documento, que, aprobado por consenso en un organismo reconocido, establece reglas y criterios para usos comunes y repetidos. Las Normas están en todas partes y nos protegen a todos. Los productos elaborados conforme a Normas son más aptos, más seguros y de mejor calidad. Aseguran la compatibilidad de los productos y la disponibilidad de repuestos que prolongan la vida útil del objeto, facilitando el comercio y colaborando con la regulación del mercado, permitiendo la transferencia de tecnología.

La actividad de “Normalización” es llevada a cabo, en cada país, por un Organismo de Normalización: entidad reconocida a escala nacional, regional o internacional. Cada nación del mundo tiene su propio Organismo Nacional de Normalización. En Argentina es el Instituto Argentino de Normalización y Certificación IRAM. Este Instituto lleva adelante las actividades de Normalización desde el año 1935, y fue reconocido en 1994 por el Poder Ejecutivo Nacional, como el Organismo de Normalización de la República Argentina. Es un ente privado, no estatal, en el que participan representantes de consumo, producción, usuarios, gobierno, comunidad científico-técnica, fabricantes de productos, etc. Desarrolla, estudia y publica Normas argentinas en todos los campos de actividad. Se debe destacar que el IRAM fue el primer Organismo de Normalización creado en América Latina, llevando elaboradas más de 13000 Normas aplicables en muy diversos ámbitos.

El proceso de elaboración de Normas se hace a través de los Organismos de Estudio (Comisiones), con la participación de representantes de distintas organizaciones que pertenecen a los tres sectores involucrados en su creación: los productores, los consumidores y los responsables de velar por el interés general y el bien común. Todos, excepto el personal del IRAM, tienen carácter honorario

En Argentina, debido a los altos estándares de calidad y seguridad que se deben aplicar en la industria nuclear, a iniciativas de la CNEA, en 1969 se creó en el IRAM el Subcomité de Ensayos No Destructivos, con competencia específica en todas las áreas de este tipo de ensayos. Recién en junio de 2000, también a pedido de la CNEA, se creó en el IRAM la Comisión de EA. Esta Comisión funciona desde entonces en forma autónoma y continua, reuniendo en promedio 5 personas en cada convocatoria mensual.

En la década de los 90, debido a la creciente regionalización latinoamericana, se creó la Asociación MERCOSUR de Normalización (AMN). Es el único organismo responsable por la gestión de normalización voluntaria en el ámbito del MERCOSUR. En junio de 2004, a propuesta de la Comisión de EA del IRAM, junto con su equivalente de Brasil (Associação Brasileira de Normas Técnicas, ABNT), se creó en ese ámbito el Comité Sectorial MERCOSUR 24 (CSM 24) con competencia específica en el tema de los END, estableciéndose también el Subcomité de Emisión Acústica. En la actualidad existen más de 12 Normas de EA publicadas en el IRAM y/o en el MERCOSUR (Catálogo de Normas IRAM y Asociación Mercosur de Normalización).

A nivel internacional también las actividades en la creación y adopción de Normas de EA, ha ido progresando rápidamente. En la “International Organization for Standardization ISO”, existía el “Technical Committee TC135” para todos los END, pero

en el año 2007 el CSM 24, propuso la creación de un grupo específico para el estudio de la EA, el “Sub Committee SC9”. Su Secretaría en la actualidad pasó de Brasil a China. En este Subcomité participan activamente 14 países y otros 5 más son “Observadores”. A su vez, cada Subcomité crea Grupos de Trabajo (“Working Groups, WG”) para tratar temas específicos, convocando a reconocidos especialistas internacionales. En esos Grupos de Trabajo, participan por Argentina, varios reconocidos especialistas de CNEA.

En Europa además existe el “European Committee for Standardization” CEN, que reúne a los Institutos de Normalización nacionales de 33 países europeos, desarrollando y publicando Normas europeas. Desde octubre de 1991, se aprobó formalmente un Acuerdo de Cooperación Técnica entre la ISO y el CEN, tratando así de no duplicar las tareas.

De acuerdo a una revisión internacional realizada por una empresa alemana fabricante de equipos de EA, existen a nivel internacional, más de 100 Códigos y Normas relacionadas con este método de END (Vallen–Syteme GmbH, Release September 2013). En la cita de la referencia, las Normas, Códigos y Prácticas están ordenadas por institución productora (ISO, ASNT, CEN, API, EPRI, ASME, IEEE, etc.), actualizadas al año 2013, con su correspondiente codificación, título, fecha de edición y comentarios. Las Normas desarrolladas en Latinoamérica no han sido incorporadas en ese documento aún, pero pueden ser consultadas en la página web de la AMN, CS24.

La Agencia Internacional de Energía Atómica (OIEA por sus siglas en inglés), dependiente de las Naciones Unidas, también desarrolla el tema de la EA en su Documento Técnico: IAEA-TECDOC 628/Rev.1. La Sección V del Código ASME, en su Artículo 12 describe el proceso de examinación por EA, de recipientes metálicos durante la prueba de presurización (ASME Code, Section V, ARTICLE 12). El Artículo 13, describe los requerimientos a usarse durante la monitorización continua por EA, en contornos de recipientes a presión metálicos y no metálicos usados en servicio, en la industria nuclear y no nuclear, (ASME Code, Section V, ARTICLE 13). En la Publicación No. 322 del “American Petroleum Institute, API”, se hace una evaluación ingenieril del método de EA para la detección de pérdidas en tanques sobre tierra, para almacenamiento.

Gran parte de la actividad de personas en el área de los END está reglamentada a escala nacional e internacional, a través de las Normas específicas para cada Método de END, y en la Norma de Calificación y Certificación de Personal, que se dedica a la aplicación de los END en la industria. Es ésta la Norma NM-ISO 9712 para la Calificación y Certificación de Personal de END. Allí están comprendidas todas las actividades industriales de EA, con los requisitos, competencias y obligaciones para los Operadores e Inspectores de EA, en sus tres posibilidades: Nivel 1, Nivel 2 y Nivel 3.

El IRAM está acreditado por el Organismo Argentino de Acreditación (OAA) para la Certificación de Personas y éste a su vez, delega la facultad de la Calificación de Personas en los Organismos de Calificación Acreditados (OCA), certificando sus acciones. En la Argentina existen pocos OCAs, entre ellos se pueden citar: la CNEA, la Universidad Tecnológica Nacional (UTN) Facultad Regional Delta y la UTN Facultad Regional Mendoza. Todos ellos están habilitados para la Calificación de Personas en los métodos de END en los que cada uno es competente, desempeñándose conforme a las indicaciones de la NM-ISO 9712.

Teniendo como marco Norma NM-ISO 9712, en la Argentina, aún no se ha podido establecer definitivamente el Sistema de Calificación de Personas que operan con la técnica de EA. En el año 2007, desde la CNEA y a través del IRAM, se pudo completar en forma provisoria el esquema de Certificación para el Nivel 1 de EA, llegando a dictarse también el primer Curso de Nivel 2, pero luego por diversas circunstancias fortuitas este proceso fue interrumpido. Por las particularidades del método de EA, la tarea de la Normalización de las actividades que profesionales y técnicos desarrollan dentro del

ámbito de los END, es muy importante y compleja de realizar, siendo ésta una tarea todavía no concretada que debe encararse seriamente entre todos los involucrados con este método.

A nivel nacional existen al menos 8 documentos gubernamentales nacionales y provinciales que nombran específicamente a la EA (Ruzzante J. et al, 2016). La documentación en el ámbito nacional y provincial donde se menciona la EA pueden encontrarse en el portal de “*Información Legislativa y Documental Oficial*”, especificando el tipo de documento y el año de su publicación.

De todo lo escrito anteriormente, se desprende la enorme importancia del uso de la EA en el mundo y en particular en la Argentina, estando presente inclusive en la documentación legal nacional y provincial.

7. CONCLUSIONES

Se han mostrado el avance y los logros más importantes de todos los colegas que han dedicado su trabajo y su esfuerzo a profundizar la comprensión de la EA, difundir su uso, ampliar sus posibilidades y potencialidades de aplicación, y obtener un nivel de ordenamiento tecnológico mínimo a través de la tarea de la Normalización.

Una prueba fehaciente de esos frutos es la realización de este Décimo Encuentro del Grupo Latinoamericano de Emisión Acústica E-GLEA 10, en el ámbito de la Universidad Nacional del Comahue en la ciudad de Neuquén, con la presentación Oral de más de 30 Trabajos de diversos campos de aplicación de la EA.

La presentación de este Trabajo, se ha realizado como tributo de homenaje a toda la comunidad de los investigadores, profesionales, técnicos y usuarios de la EA en América del Sur y especialmente en Argentina. Todos ellos, desde hace muchos años han sabido unirse para profundizar el conocimiento en esta área de la ciencia, compilar e intercambiar sus experiencias en fraterna comunidad que potencia y aumenta la sinergia de sus trabajos individuales. Parte de esa tarea ha sido posible gracias a la creación y funcionamiento del Grupo Latinoamericano de Emisión Acústica GLEA y de todos sus integrantes.

REFERENCIAS

- Acoustic Emission Examination of Metallic Vessels During Pressure Testing, *ASME Code, Section V, ARTICLE 12*.
- Acoustic Emission Working Group, AEGW, <http://www.aewg.org/>
- An Engineering Evaluation of Acoustic Methods of Leak Detection in Aboveground Storage Tanks, *API Publication Number 322*.
- Asociación Mercosur de Normalización, AMN, <https://www.amn.org.br/>
- Asociación Mercosur de Normalización:
https://www.amn.org.br/Content/Documentos/ptCartilha_AMN_FINAL2.pdf
- Catálogo de Normas IRAM, <http://www.iram.org.ar/index.php?id=Catalogo-de-normas>
- Code, Standards, Practices, and Guidelines related to Acoustic Emission (AE), *Vallen-Syteme GmbH, Release September 2013*.
- Continuous Acoustic Emission Monitoring, *ASME Code, Section V, ARTICLE 13*.
- Drouillard, T.F., A History of Acoustic Emission, *Journal of Acoustic Emission, vol. 14, N°1*, pp. 1-34, 1996.
- European Committee for Standardization, <https://www.cen.eu>
- European Working Group on Acoustic Emission (EWGAE), <http://www.ewgae.eu/>
- Grupo Latinoamericano de Emisión Acústica (GLEA),
<https://www.cnea.gob.ar/cac/glea/>
- Información Legislativa y Documental Oficial INFOLEG, www.infoleg.gov.ar

- Instituto Argentino de Normalización y Certificación IRAM,
<http://www.iram.org.ar/index.php>
- International Standard Organization ISO, <https://www.iso.org/standards.html>
- Kaiser J. Untersuchung über das Auftreten von Geräuschen beim Zugversuch, *Dr.-Ing. Dissertation, Fakultät für Maschinenwesen und Elektrotechnik der Technischen Universität München (TUM)*; 1950.
- López Pumarega M. I., Piotrkowski R., Ruzzante J. E., The history of the Latin American Acoustic Emission Group (GLEA), *NDT.net, Vol. 7 No.09*, September 2002.
- Normas MERCOSUR de END, <https://www.amn.org.br/Paginas/NormasGeral>
- Palacios T., Antecedentes históricos de la Emisión Acústica en Latinoamérica, *Primer Encuentro del Grupo Latinoamericano de Emisión Acústica, E-GLEA 1*,
<http://www.cnea.gov.ar/cac/glea/trabajos/palacios.pdf>, 2001.
- Ruzzante J. E., López Pumarega M. I., Piotrkowski R., The status of Acoustic Emission in Argentina, *Insight, ISSN: 1354-2575, Vol. 46, No. 12*, pp.733-735, 2004.
- Ruzzante J., López Pumarega M. I., *Emisión Acústica, un diálogo con los Materiales*,
<https://www.ciencias.org.ar/user/Ruzzante.pdf>, 2016.
- Training guidelines in non-destructive testing techniques, *IAEA-TECDOC 628/Rev.1*.
- Vallen–Syteme GmbH, Code, Standards, Practices, and Guidelines related to Acoustic Emission (AE), Release September 2013,
http://www.vallen.de/zdownload/pdf/AE_Standards_1309.pdf

□

**GRUPO LATINOAMERICANO
de
EMISION ACUSTICA**

GLEA

ISBN 978-987-1323-65-4



ISBN 978-987-1323-65-4



COMISIÓN NACIONAL
DE ENERGÍA ATÓMICA