

REPUBLICA ARGENTINA  
COMISION NACIONAL DE ENERGIA ATOMICA  
Dependiente de la Presidencia de la Nación  
GERENCIA DE DESARROLLO

01.83.26.  
04.83

INTRODUCCION A LA EMISION ACUSTICA

Marta Susana GRANOVSKY y José E. RUZZANTE

Buenos Aires

1983

## INTRODUCCION

Se entiende por emisión acústica (EA) en un material, a la liberación rápida de energía elástica, como consecuencia de procesos microestructurales. Dichos procesos pueden ser clasificados en tres grandes grupos, a saber:

- a) Deformación plástica (movimiento y creación de dislocaciones, maclado, etc)
- b) Transformaciones de pares (martensíticos), efecto Portevin-Lechatelier, reorientación de dominios magnéticos.
- c) Iniciación y crecimiento de fisuras, separación brusca de componentes microestructurales.

Los primeros trabajos en EA se remontan a la primera mitad de la década del 50. Los cuales fueron realizados por Kaiser (1). Pero el mayor desarrollo de la técnica se produce en los últimos 15 años en los cuales se centró el estudio en la posibilidad de detectar, localizar e identificar fallas en estructuras.

Algunas de las optimistas expectativas puesta en esta técnica no han sido aún concretadas. Las causas de esto son varias, posiblemente la más importante sea la naturaleza cualitativa de las mediciones que dificultan las comparaciones. Sin embargo, en los últimos años se iniciaron estudios para la comprensión de aspectos básicos, tales como naturaleza de las fuentes de EA, propagación de ondas elásticas y su detección.

Siendo los procesos microestructurales, que producen los eventos de EA, de diversos orígenes, es de esperar que la energía liberada tenga un amplio espectro, encontrándose variaciones entre  $10^{-9}$  erg a 1 erg, algo equivalente sucede con las frecuencias características de los eventos, las que cubren un rango comprendido entre pocos décimos de KHz a varios Mhz.

El límite superior es impuesto por la atenuación ejercida por el material, la que no permite a las vibraciones llegar a la superficie del mismo para ser detectadas. Con respecto al límite inferior de aproximadamente 100 KHz es impuesto para evitar los ruidos provenientes de vibraciones mecánicas o producidos por el movimiento de fluidos que generalmente son de baja frecuencia, luego el rango útil queda comprendido entre 100 KHz y 1 Mhz.

Otra de las peculiaridades de la EA es su irreversibilidad, Kaiser fue el primero en observarlos (efecto Kaiser). Si un material es sometido a una carga y se deforma plásticamente emitiendo ondas elásticas, al descargar y volverlo a cargar necesitará superar la carga inicial para volver a emitir.

INSTRUMENTACION PARA LA DETECCION DE EA

La detección de las señales de EA requiere como equipamien  
to mínimo:

- 1) transductores muy sensibles y de alta resolución
- 2) amplificadores de elevada ganancia y buena relación se-  
ñal-ruido, más un filtro.
- 3) Discriminador - cuadrador
- 4) convertidor frecuencia-tensión
- 5) registrador

La configuración puede observarse en el diagrama en blo-  
que de la Fig. 1.

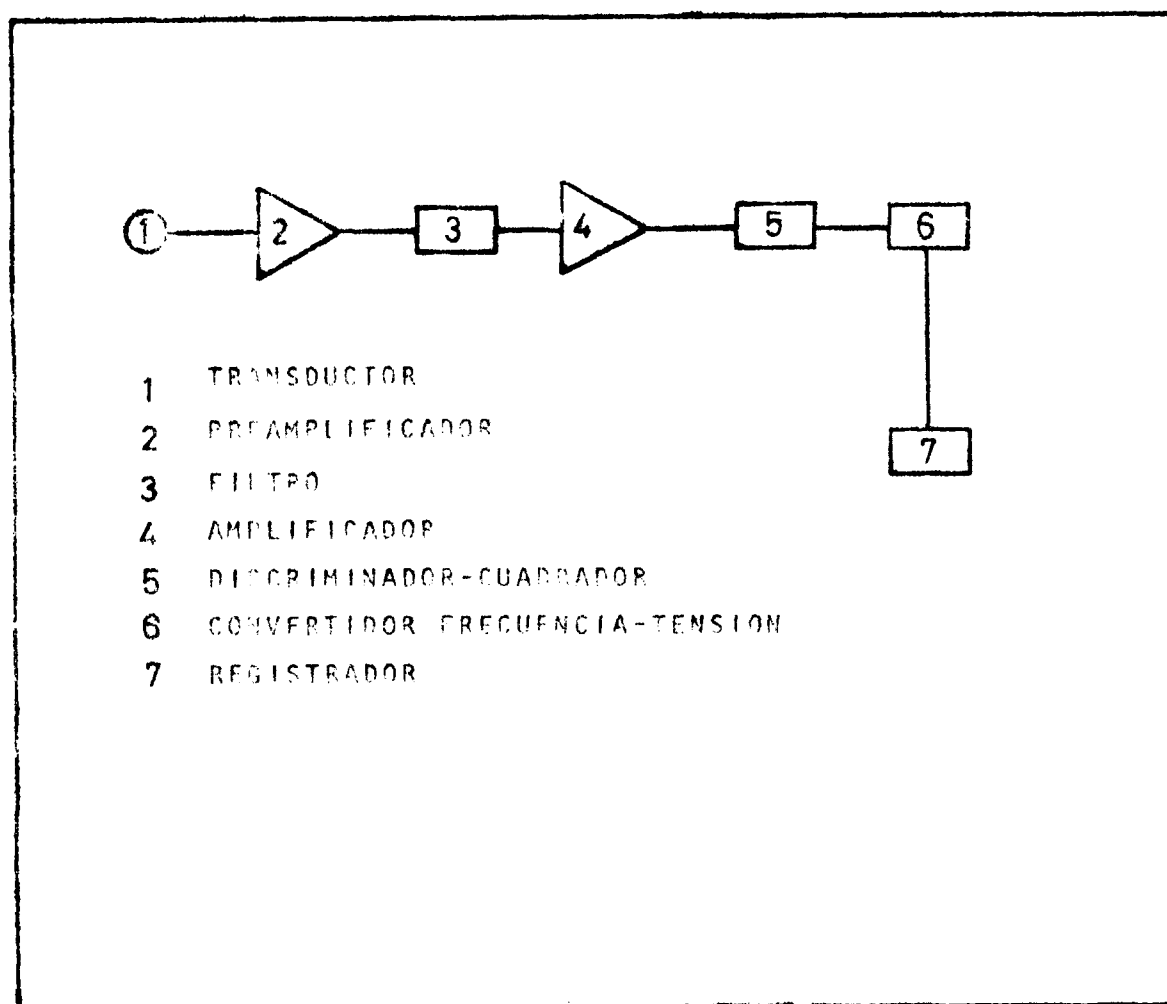


Figura 1

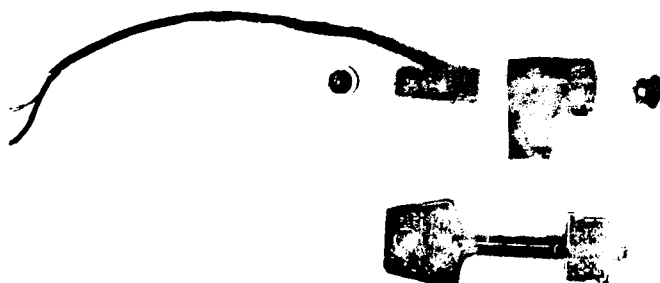
### 1) Transductor

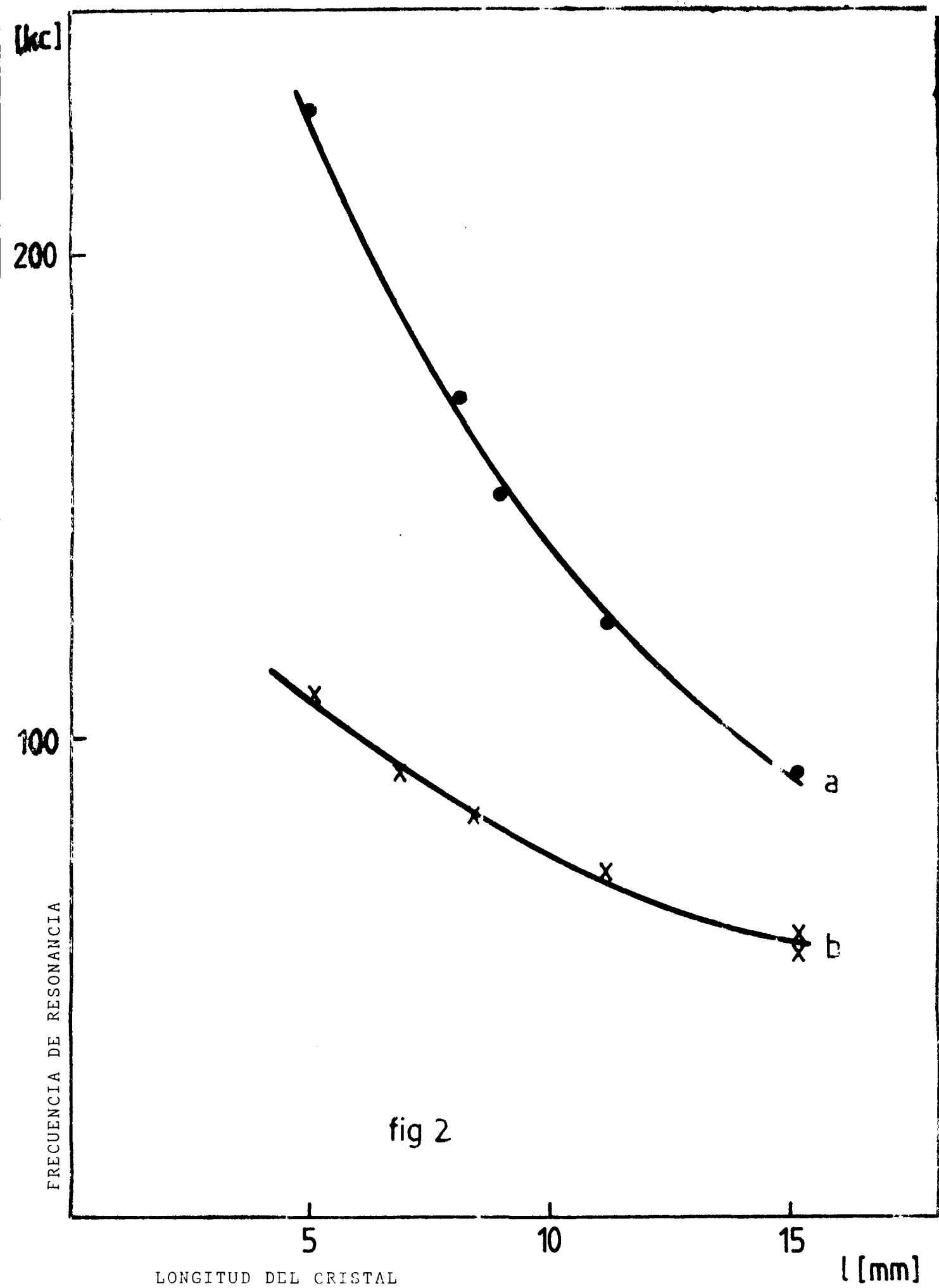
Un transductor ideal debería medir la vibración mecánica en la superficie de la muestra producida por la fuente de EA y convertirla linealmente en una señal eléctrica que cubra el ancho de banda de todo el espectro de frecuencias probables.

La sensibilidad del transductor debe ser alta, pues hay perturbaciones menores que  $10^{-10}$  m. Tales detectores no existen en la actualidad (2). La mayoría de los traductores utilizados en EA son del tipo piezoeléctrico (Zircotitanato de plomo), los que tienen una sensibilidad elevada (desplazamientos mayores que  $10^{-14}$  m) pero sólo responden correctamente en una estrecha banda de frecuencia usualmente entre 50 y 1000 KHz. Si lo que medimos son pulsos es posible sintonizar el amplificador y detectar pulsos sólo a la frecuencia de resonancia del piezoeléctrico ganando con esto sensibilidad. Pero perderemos información sobre la forma de onda. Por el contrario si lo que deseamos es estudiar forma de onda (análisis de Fourier) debe utilizarse un detector que no modifique la forma de ésta. Un traductor piezoeléctrico puede trabajar en forma relativamente lineal si lo hacemos funcionar con frecuencias menores que la mitad de la de resonancia.

Es posible utilizar otros tipos de detectores, por ejemplo el capacitivo (3). Las ventajas de este sensor son: su ancho de banda grande, generalmente se extiende desde cc a 50 Mhz. pueden ser calibrados y son lineales. Pero la principal desventaja es su sensibilidad ( $\geq 10^{-12}$  m) por lo tanto sólo se lo usa para emisiones muy energéticas. En lugares poco accesibles puede en principio usarse detectores ópticos (4) pero fueron poco desarrollados.

Los traductores piezoeléctricos en resonancia pueden ser contruidos fácilmente en el laboratorio usando cristales de "encendedores de gas". Los que son encapsulados en carcasas metálicas aislados con alguna resina acrílica. Los contactos eléctricos se lo gran con depósitos de plata en vacío o pintando las superficies de los extremos con alguna pintura conductora. El armado puede observarse en la siguiente foto.





La frecuencia de resonancia de un cristal piezoeléctrico depende de las dimensiones y forma del mismo, así también como del tipo de encapsulado. Para un diámetro fijo de 7 mm la variación de la frecuencia de resonancia con la longitud se muestra en la curva a de la fig. N°2, la variación con el cristal encapsulado se ve en la curva b de la misma figura. Obsérvese que para una longitud de 10 mm (la cual permite un fácil manipuleo en el laboratorio) se obtiene una frecuencia de resonancia del orden de 100 KHz.

## 2) Amplificador y filtros

Puesto que las señales que da el detector son de muy baja amplitud ( $\sim 10 \mu V$ ) se lo debe amplificar considerablemente.

Los requerimientos para este tipo de equipo son importante, pues téngase en cuenta el amplio rango de frecuencia contenido en la señal, como también las importantes variaciones de amplitud encontradas para un mismo ensayo y si a ésto le agregamos un nivel de ruido bajo es difícil de lograrlo. Afortunadamente la literatura sobre el tema es amplia, existiendo distintos tipos de circuitos que cumplen con la mayoría de los requerimientos (5). Como ya fue mencionado, para eliminar los ruidos mecánicos (baja frecuencia) y electromagnéticos (alta frecuencia) se utilizan distintos tipos de filtros que generalmente suprimen valores por debajo de los 100 KHz y por arriba de 1 Mhz, excepto que se trabaje en resonancia, en cuyo caso se debe elegir la frecuencia de resonancia del cristal.

## 3) Discriminador-cuadrador

En adelante sólo se comentarán los equipos más simple de realizar, que son aquellos que se encuentran sintonizados.

Puesto que se trabaja en resonancia, la señal a la salida del sensor es el transitorio amortiguado de éste, teniendo el aspecto que se observa en la Fig. 3 (a).

Fijando un nivel de tensión a partir del cual se dispara un generador de ondas cuadradas, dando un pulso por cada pico que sobrepasa el nivel (método Ringdown de conteo). Se logra convertir el pulso en un tren de ondas cuadradas y suprimir el ruido de fondo, si se coloca el nivel en posición adecuada. De lo contrario contamos también el ruido de fondo como pulso (Fig. 3 (b)).

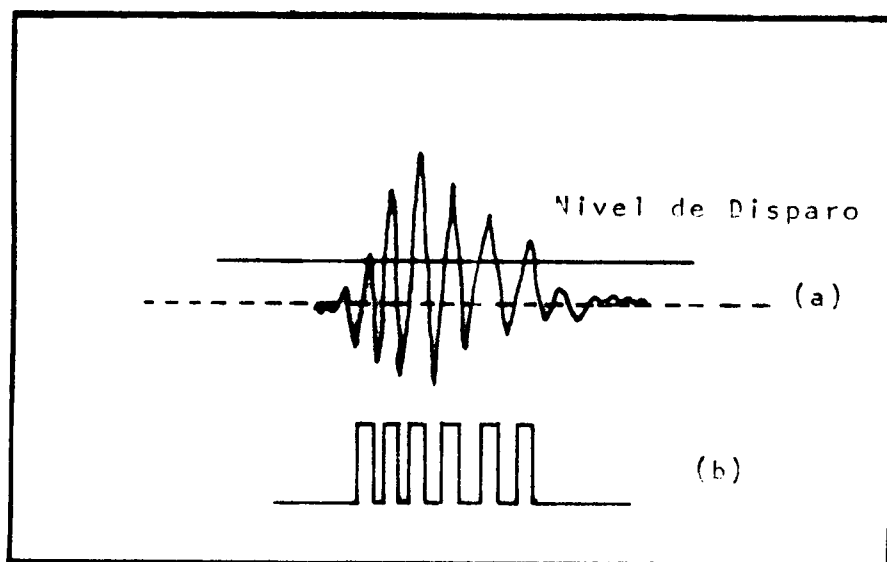


Figura 3

#### 4) Convertidor frecuencia-tensión

En esta etapa se determina la velocidad de aparición de pulsos. Obteniéndose a la salida del módulo una tensión proporcional a la frecuencia de los pulsos. En otros casos puede colocarse un totalizador y obtener de esta forma la suma total de los pulsos.

#### 5) Registrador

En esta etapa se registra la velocidad de aparición de los pulsos.

Por supuesto que lo aquí descrito, es lo más simple para la detección de la emisión acústica. Encontrándose en distintos trabajos equipos y técnicas muy elaborados, por ejemplo:

- a) Análisis de amplitudes (de utilidad para reconocer las diferentes fuentes)
- b) Análisis de frecuencia (caracteriza distintos mecanismos mucho más complicados en su interpretación).
- c) Medición de energía (se determina el cuadrado de la amplitud o por técnicas de autocorrelación).
- d) Localización de Fuentes de EA (se utilizará más de un transductor según la ubicación de la fuente y el método empleado).
- e) Métodos de correlación, que permiten determinar señales por debajo del nivel de ruido.

## ALGUNOS MODELOS SOBRE FUENTES DE EMISION ACUSTICA

Son muchos los intentos realizados para tratar de idear modelos microscópicos que den cuenta de las fuentes de EA.

Los éxitos obtenidos son parciales, no existiendo actualmente una teoría o modelo de aplicación general.

Aquí comentaremos algunos de estos modelos. Como regla relativamente general puede afirmarse que la creación o el movimiento de dislocaciones son las causas de la EA.

Un gran número de trabajos proponen modelos de fuentes de EA basados en mecanismos de deformación. Para algunos son fuentes de Frank-Read (7-16) y para otros son desapilamientos de dislocaciones por deslizamiento (17). Se puede, con ambos mecanismos representar las fuentes de EA como movimientos cooperativos rápidos de un gran número de dislocaciones.

Johnston y Gilman (6) proponen mecanismos de multiplicación de dislocaciones por deslizamiento cruzado múltiple a partir del cual encuentran la expresión siguiente:

$$\rho_m = (\rho_0 + \alpha \epsilon) e^{-\alpha \epsilon}$$

que da la variación de la densidad de dislocaciones móviles ( $\rho_m$ ) con la deformación ( $\epsilon$ ). Es natural tratar de relacionar esta densidad  $\rho_m$  con la velocidad de emisión ( $N$  = cuentas/tiempo) (7). Lamentablemente esta relación fue sólo encontrada para un tipo de aleaciones de Al. Lo que indicaría que no es este el único mecanismo de emisión. James y Carpenter (8) trabajando en cristales de LiF y NaCl, afirman haber hallado una razonable correlación entre  $N$  y el cambio en la densidad de dislocaciones móviles. Puede citarse otros trabajos realizados en esta dirección por ejemplo: H. Hatano (9). Recientemente comienzan a aparecer trabajos de simulación por computadora, de EA (10).

Existe otra tendencia en la investigación de la EA, más teórica que las comentadas anteriormente. En esta se pretende encontrar los pulsos generadores durante deformación plástica, debido al movimiento de dislocaciones, por ejemplo el trabajo de Malen-Bolen (11), quienes calcularon el campo de radiación acústica producido por una perturbación en un medio isótropo, o bien la señal acústica producida por una dislocación en movimiento uniforme o acelerado (12-13). En todos los casos son importantes las aproximaciones a realizar para arribar a resultados concretos.

Camino similares se han seguido en los otros campos de aplicación de la EA, como ser transformaciones de pares y nucleación-crecimiento de fisuras.

### Comentarios Generales

Sí bien solamente nos referimos a la EA en metales es importante puntualizar que investiga en otros materiales, por ejemplo:

plásticos, plásticos reforzados, cerámicos, cemento armado, etc.  
No pensemos que la EA se "inventó" en los metales, al fin y al cabo,  
un sismógrafo es un gran detector de EA.

En el país existen aproximadamente, unos diez años de investigación de EA en metales, con varios trabajos a nivel internacional y dos tesis doctorales (13-14).

## APLICACIONES DE LA EMISION ACUSTICA

Las aplicaciones de la técnica de EA son tan diversas como la cantidad de procesos microestructurales que la producen y pueden separarse en dos grandes ramas:

- estudio del comportamiento de materiales
- integridad de estructuras (END)

### La EA y la deformación plástica

La EA es una técnica adecuada para el estudio de deformación plástica en diferentes materiales. Cuando un material es deformado las características generales de la EA son: la actividad se inicia en la zona de dominio elástico pasando por un máximo alrededor del límite elástico y disminuye suavemente durante la deformación plástica (Fig.4). Este comportamiento coincide con la idea de que la actividad acústica está asociada con el movimiento y creación de dislocaciones.

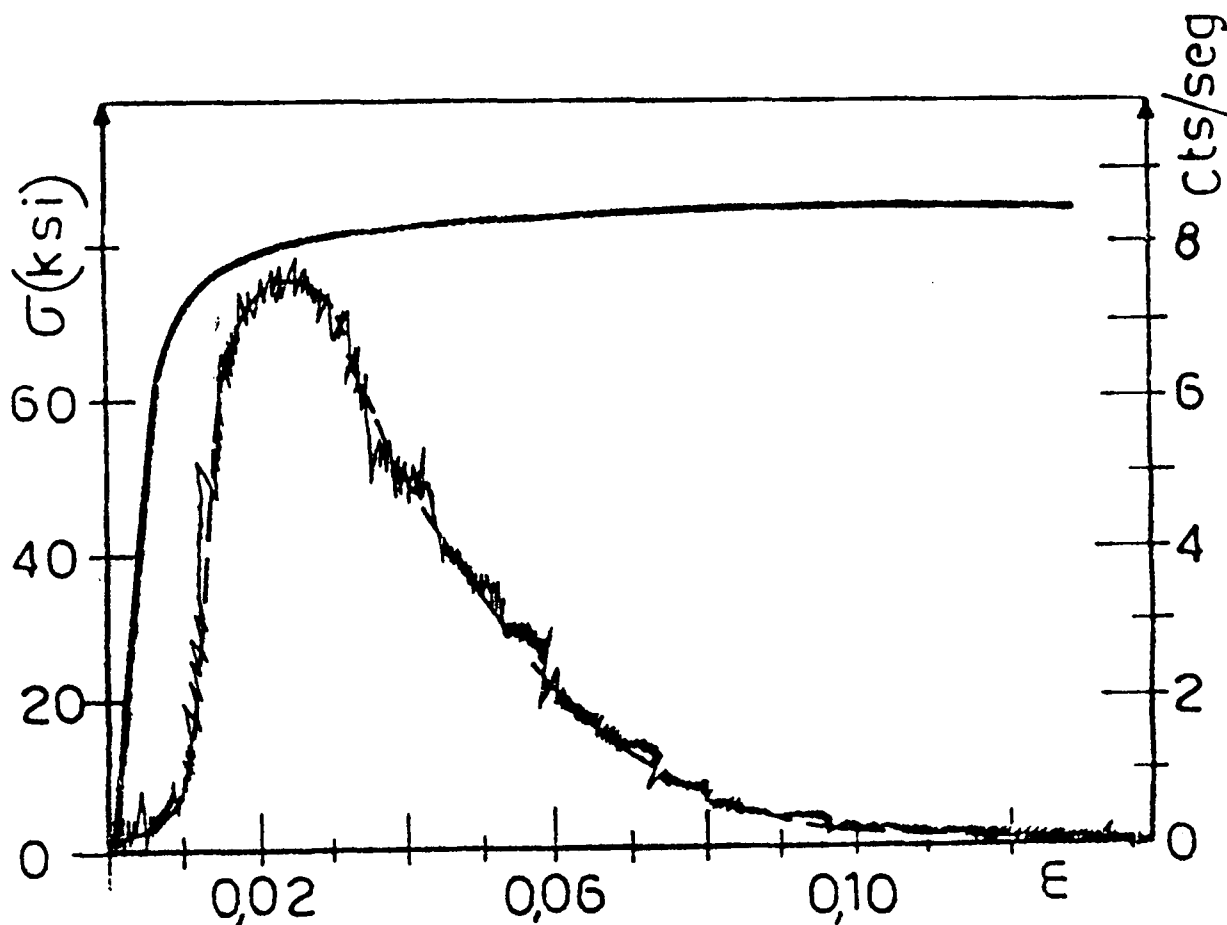


Figura 4

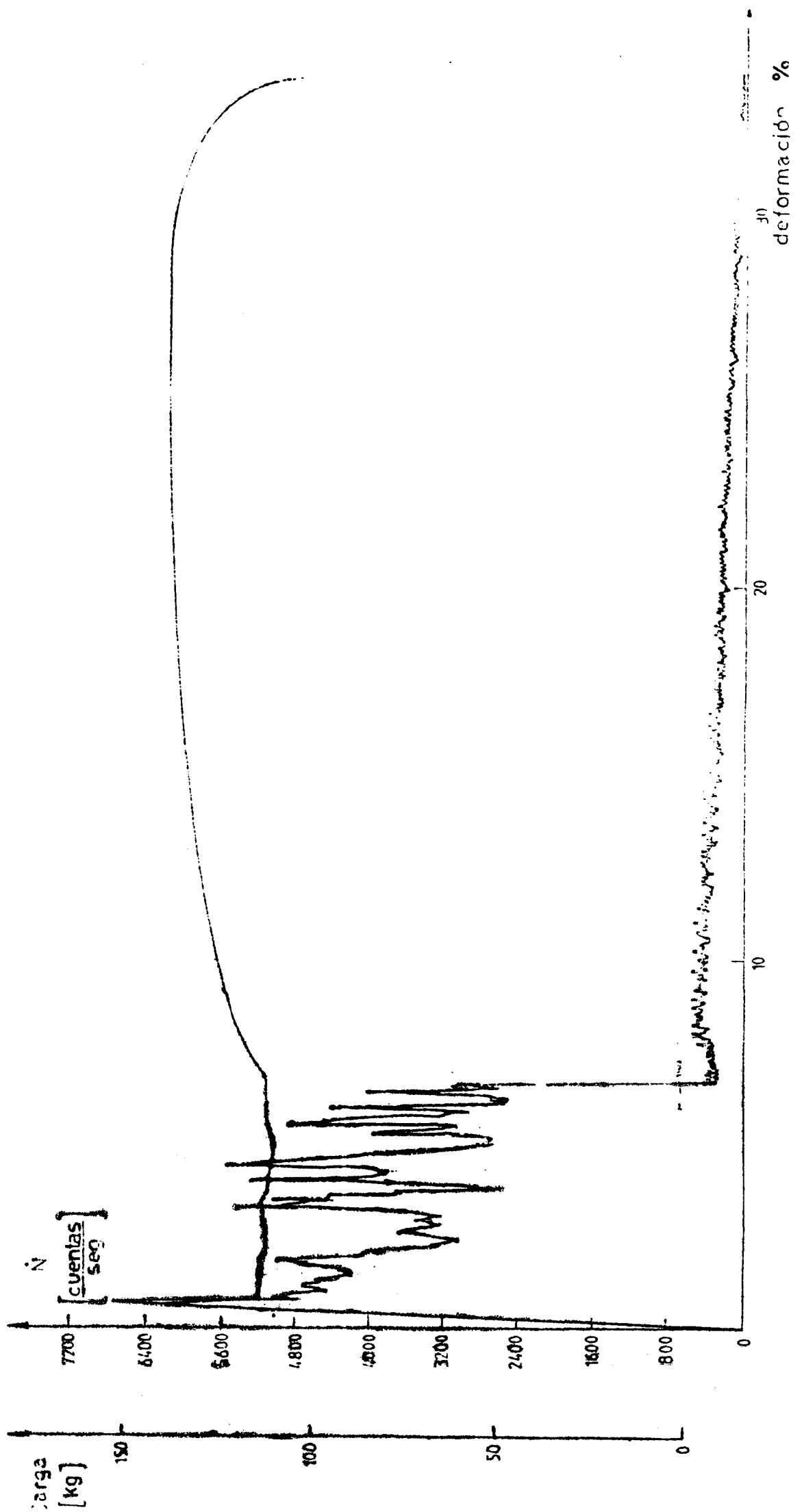


Figura 5

En materiales que deforman homogéneamente, la EA es esencialmente continua y la energía emitida es proporcional a la velocidad de propagación, en materiales con deformación inhomogénea la actividad también comienza en la zona de macroelasticidad, en la zona de bandas de Luder la actividad acústica es mucho más intensa y se pueden asociar sus variaciones a la formación y movimiento de cada banda, durante el resto de la deformación plástica la actividad disminuye notablemente (Fig. 5) (15).

En deformación de monocristales se observó el aumento de la emisión con la velocidad de deformación aunque puede producirse una disminución en deformaciones producidas a muy altas velocidades (18).

En deformación de materiales policristalinos tiene gran influencia el tamaño de grano en la velocidad de conteo, aunque existen discrepancias entre los modelos teóricos existentes y los resultados experimentales. Esto puede estar afectado por las impurezas del material (19).

#### Emisión Acústica durante las transformaciones martensíticas

Las transformaciones martensíticas producen una variación abrupta del volumen transformado, lo que trae asociado una intensa emisión de ondas elásticas, tanto en las producidas térmicamente como las inducidas por deformación (20).

Las técnicas de EA en el estudio de transformaciones martensíticas tienen una gran sensibilidad en la determinación de la temperatura de inicio de la transformación ( $M_s$ ), produciéndose un máximo de actividad alrededor del mismo (21).

Maeder y otros (22) sugieren la existencia de dos procesos diferentes que contribuyen a la EA asociada a la transformación termoelástica: relajación de tensiones debida al movimiento de la interfase y movimiento de dislocaciones antes y después de la transformación.

Existen otros trabajos que también asocian a la emisión producida durante la transformación, dos procesos diferentes que le dan origen (23).

#### La Emisión Acústica y los procesos de fractura

El análisis de las características de la EA (número de cuentas, velocidad de conteo, distribución de amplitudes etc) detectada durante un proceso de fractura es útil para obtener detalles del mecanismo que la produjo. Se atribuye, en general, el origen de la actividad acústica al volumen de material deformado plásticamente en la punta de la fisura y al propio proceso de fractura.

En trabajos realizados en propagación de fracturas dúctiles se encontró que algunos materiales producen una intensa actividad acústica mientras que otros no producen emisión detectable (24-25).

Aunque esta diferencia no tiene aún una explicación, para su análisis se debe tener presente la influencia de la tensión de fluencia de cada material, de manera que el umbral de amplitudes del

sistema no impide la detección en los materiales de tensión de fluencia baja. También existe la posibilidad de que los procesos de fractura de materiales con tensiones de fluencia muy altas o muy bajas sean diferentes.

Una de las primeras aplicaciones de la EA se realizaron en fracturas producidas por fragilización por hidrógeno y por corrosión bajo tensión, especialmente en el estudio del inicio de la fractura. Aunque no se encontraron resultados precisos sobre la comprensión de los micromecanismos de las fracturas (26).

Algo similar ocurre con la aplicación de la EA en el crecimiento de fractura por fatiga. Se observa, en general, un pico de actividad acústica en el máximo de carga, atribuido a la extensión de la fractura y a la deformación producida en la zona plástica formada en la punta de la fractura; otro pico de actividad se produce para el mínimo de carga pudiéndose atribuir al cierre de la fractura y dependiendo de la rugosidad de las caras (27).

#### Aplicación de la EA como Ensayo no Destructivo

La idea de la utilización de la EA como técnica de END surge como consecuencia de que el movimiento de dislocaciones durante la deformación plástica y la propagación de fisuras puede ser controlado por EA. Esto indica que es posible detectar una falla en incubación y seguir su cinética.

El estado de sollicitación que necesita el material para realizar su control con métodos acústicos puede ser realizado aplicando cargas (fuerza, presión, etc) utilizando las condiciones de operación o sometiénolo a un tratamiento térmico adecuado. Es posible, entonces, la inspección de componentes en el proceso de fabricación, en preservicio o en servicio.

Aunque aún existen problemas en la inspección "on line" debido a ruidos espúreos, temperatura y su influencia en los detectores etc.

El aval fundamental de la EA como END es que permite: 1) detectar la presencia de un eventual defecto en el componente sometido a carga.- 2) Determinar la posición del defecto en la pieza. La localización de la fuente de EA se basa en la precisión con que se mide la diferencia de tiempo en que llegan las señales a los detectores.

Supongamos tres detectores en la superficie de una pieza (Fig.6) consideramos primero los detectores 1 y 2 y sea  $\Delta T_{12}$  la diferencia de tiempo de llegada de una señal de EA proveniente de la fuente S. La fuente S encontrará sobre la hipérbola  $Y_{12}$  que tiene por focos las posiciones de los detectores 1 y 2 y cuya diferencia está definida por  $v \cdot \Delta T_{12}$  (v: velocidad de propagación en el medio).

Haciendo igual razonamiento para los detectores 1 y 3 con una diferencia de tiempos de llegada  $\Delta T_{13}$ , la hipérbola  $Y_{13}$  tendrá por focos las posiciones de los detectores 1 y 3 y por diferencia  $v \cdot \Delta T_{13}$ . La fuente se encontrará en las intersecciones de  $Y_{12}$  e  $Y_{13}$ , estas intersecciones pueden ser más de una pudiendo llegar a ser 4 y para individualizar el lugar exacto de la fuente  $S$  es necesaria la participación de un cuarto detector que determine una tercera rama de hipérbola  $Y_{14}$  sobre la que se encontrará  $S$ .

El cálculo de localización de la fuente aunque no es conceptualmente difícil, es muy engorroso y se hace indispensable el uso de microcomputadoras (28).

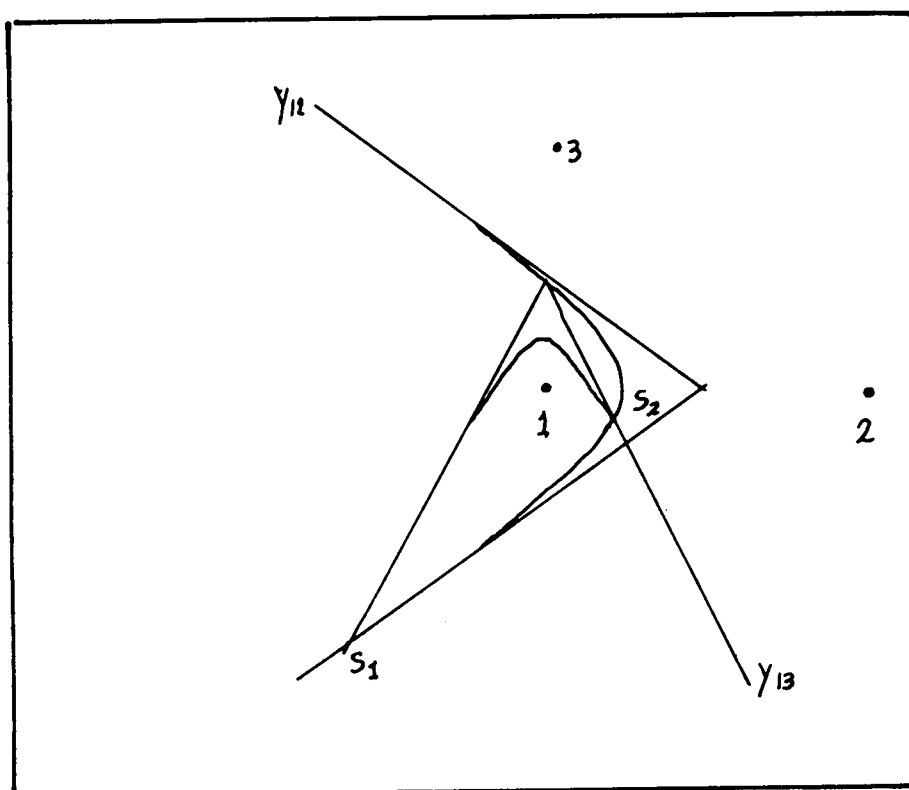


Figura 6

Las aplicaciones más importantes de la EA como END hasta el presente son:

- Procesos de soldadura. La detección de posibles defectos producidos durante el proceso de soldadura son detectados en tiempo real, pudiéndose reparar los mismos antes de finalizar todas las pasadas. La localización de la fuente se puede considerar lineal usando sólo dos transductores (29-30).

- Detección de pérdidas. Utilizada en diferentes tipos de tuberías. Su detección por técnicas de EA se basa en el análisis de la atenuación de las señales (31).
- Inspección de recipientes de presión (32).
- Inspección de plataformas submarinas (33).
- Inspección de estructuras de concreto (34).

REFERENCIAS :

- 1) J. KAISER PhD. Tesis Techn. Hochsch. Munchen 1950.
- 2) H. WADLEY, B. SCRUBY, H. SPEAKE Int. Metal. Rev. 1980 41.
- 3) Interim Report N.P. 2089 Oct. 1981 Nat. Bureau of Stand.
- 4) H. PALMER, R. GREEN; Materials Evaluat. Oct. 1977, 107.
- 5) BEATTIE; JARAMILLO - Review. Scient. Inst. 45 (3) 1974.
- 6) W. JOHNSTON, J. GILMAN J. APPL. PHYS. 1960, 31, 632.
- 7) H. DUNEGAN, D. HARRIS; Ultrasonics 1969 160.
- 8) D. JAMES, H. CARPENTER, J. APPL. PHYS Vol. 42 N° 12 (1971)
- 9) H. HATANO, J. APPL. PHYS 48 (1977) 4397.
- 10) J. MASUDA; Trans. of the Japan Inst. of Met. Vol. 23 N° 11 (1982 ) 674.
- 11) K. MALEN, L. BOLIN; Phys Status Solidi 1974, 61, 637.
- 12) G. CORTELLAZI, S. BOFFI, G. CAGLIOTTI, F. RORRITO : J. APPL. PHYS. 1973 44 (4).
- 13) Sergio MINTZER Tesis Int. Balseiro Bariloche 1979.
- 14) C.H. CASERES, Tesis, Universidad de Córdoba 1980.
- 15) L' emission Acoustique et Ses applications. J.P. FAYOLLE. Publicación de Intercontrolé. 3/1.2.3/78-072/F.
- 16) R.T. SEDGWICK. J. APPL PHYS. 1968, 39 (3).
- 17) R.M.FISHER, J.S. LALLY. CAN. J. PHYS. 1967, 45, 1147.
- 18) P. JAX, J. EISENBLATTER - BATTELLE FRANKFURT. INFORMATION 1973, 15,2.
- 19) R. BILL, PH D THESIS, UNIVERSITY OF MICHIGAN, 1970.
- 20) C.H.CASERES, W. ARNEODO, R. PASCUAL, H.R. BERTORELLO SCRIPTA MET. VOL. 14, 293-297, 1980.
- 21) R. PASCUAL, M. AHLERS, R. RAPACIOLI - SCRIPTA MET. VOL. 9, 79-84, 1975.
- 22) D. MAEDER, P. RYSER, B. SANDERSOW, A. SILLOU, A. STEINER-INCOMAT 82 - Universite Catholique de Louvain, Belgique.
- 23) A.V. KULENIN, Salov'yev, Zambrzhitskiy, Zhiryakov - Phys. Met. Metall. Vol. 48 N° 1 - 110-114-1978.
- 24) T. INGHAM, A.L. STOTT, A. COWAN. Inst. J. Pressure Vessels Piping 2,1,31 1974.
- 25) K. ONO, H. UCISIC Mater Eval. 34,2,32, 1976.

- 26) D.G. CHAKRAPANT, E.N. PUGH Metall Trans. 6 A, 1155, 1975.
- 27) T.C. LINDLEY, I.G. PALMER, C.E. RICHARDS. Mat. Sc. and Eng. 32, 1-15, 1978.
- 28) G. POSSA. Il Giornale delle Prove non Distruttive n° 4, 23, 1981.
- 29) W.D. JOLLY. Reprinted from Welding Juornal 1969.
- 30) S. J. VAHAVIOLOS, M.F. CARLOS, S.J. SLYKHOUS, S.J. TERNCH--  
CHEK. Mat. Evaluation 39, 11, 1057, 1981.
- 31) A.E. LORD, J.N. DEISHER, R.M. KOERNER.  
MAT. EVALUATION 49, NOVIEMBRE 1977.
- 32) N. OHTSUKA, M. NAKANO, H. UYEYAMA. J. of. Pressure Vessel  
Technology. Vol. 103, 191, 1981.
- 33) D. BOZZETTI, R. BRANDI, E. FONTANA y otros.  
Tenth World Conference on N.D.T., Moscow, 1982.
- 34) D. BOZZETTI, E. FONTANA, F. TONOLINI, G. VILLA. 6<sup>th</sup> Internatio-  
nal Acoustic Emission Symposium, Susono City (Tokyo) 1982.