

## Tesis de Posgrado

# Estudio de la emisión acústica generada por deformación en tubos, sus fuentes y características

López Pumarega, María Isabel

1999

Tesis presentada para obtener el grado de Doctor en Ciencias Físicas de la Universidad de Buenos Aires

Este documento forma parte de la colección de tesis doctorales y de maestría de la Biblioteca Central Dr. Luis Federico Leloir, disponible en [digital.bl.fcen.uba.ar](http://digital.bl.fcen.uba.ar). Su utilización debe ser acompañada por la cita bibliográfica con reconocimiento de la fuente.

This document is part of the doctoral theses collection of the Central Library Dr. Luis Federico Leloir, available in [digital.bl.fcen.uba.ar](http://digital.bl.fcen.uba.ar). It should be used accompanied by the corresponding citation acknowledging the source.

**Cita tipo APA:**

López Pumarega, María Isabel. (1999). Estudio de la emisión acústica generada por deformación en tubos, sus fuentes y características. Facultad de Ciencias Exactas y Naturales. Universidad de Buenos Aires.

[http://digital.bl.fcen.uba.ar/Download/Tesis/Tesis\\_3157\\_LopezPumarega.pdf](http://digital.bl.fcen.uba.ar/Download/Tesis/Tesis_3157_LopezPumarega.pdf)

**Cita tipo Chicago:**

López Pumarega, María Isabel. "Estudio de la emisión acústica generada por deformación en tubos, sus fuentes y características". Tesis de Doctor. Facultad de Ciencias Exactas y Naturales. Universidad de Buenos Aires. 1999.

[http://digital.bl.fcen.uba.ar/Download/Tesis/Tesis\\_3157\\_LopezPumarega.pdf](http://digital.bl.fcen.uba.ar/Download/Tesis/Tesis_3157_LopezPumarega.pdf)

**EXACTAS** UBA

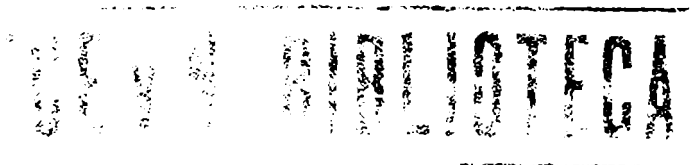
Facultad de Ciencias Exactas y Naturales



**UBA**

Universidad de Buenos Aires

**UNIVERSIDAD DE BUENOS AIRES**  
**Facultad de Ciencias Exactas y Naturales**  
**Departamento de Física**



**ESTUDIO DE LA EMISIÓN ACÚSTICA GENERADA POR  
DEFORMACIÓN EN TUBOS, SUS FUENTES Y  
CARACTERÍSTICAS**

por

**María Isabel López Pumarega**

**Director de Tesis:** Dr. José Evaristo Ruzzante.

**Lugar de Trabajo:** COMISIÓN NACIONAL DE ENERGÍA ATÓMICA,  
Centro Atómico Constituyentes, Unidad de Actividad Ensayo No  
Destructivos y Estructurales, Laboratorio de Ondas Elásticas.

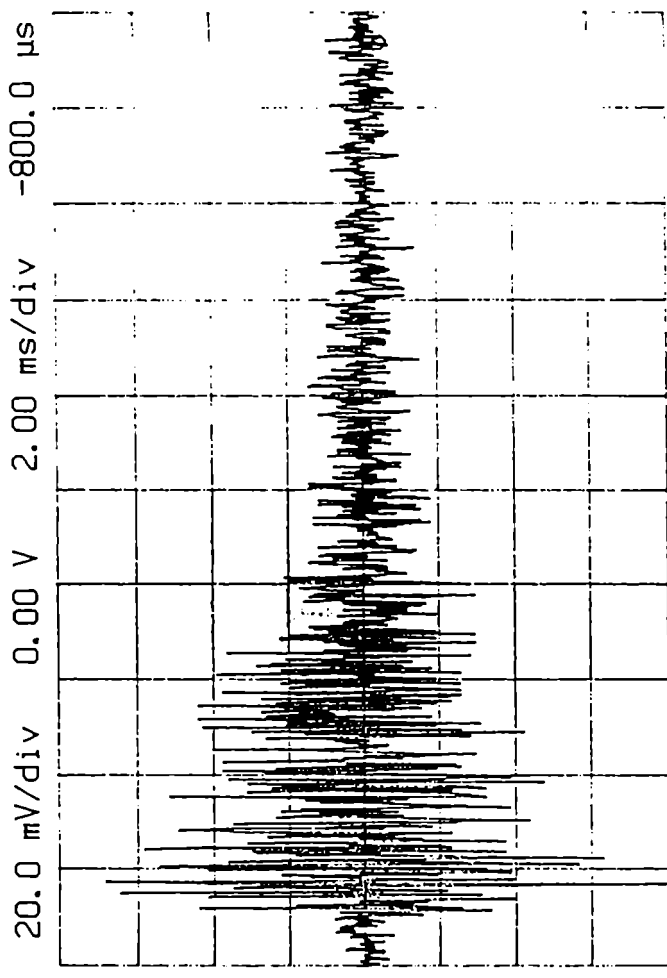
**Trabajo de Tesis para optar por el título de Doctora en Ciencias  
Físicas**

REPÚBLICA ARGENTINA

Mayo de 1999

Timebase \_\_\_\_\_ Status: Acquired Frame 00291 \_\_\_\_\_

Mode [ Trig'd ]      Auto Scale [ Disabled ]  
Range 20.0 ms      Reference [ Left ]  
Delay -800.0  $\mu$ s      Sampling @ 50.0 kHz



Graph [ 1 ]      20.0 mV/div      0.00 V      2.00 ms/div      -800.0  $\mu$ s

Cursor X      ↓

Vx 0.00 V  
Tx 160.0  $\mu$ s

V0 -3.87 mV  
T0 18.52 ms

$\Delta$ V -3.87 mV  
 $\Delta$ T 18.36 ms

# ESTUDIO DE LA EMISIÓN ACÚSTICA GENERADA POR DEFORMACIÓN EN TUBOS, SUS FUENTES Y CARACTERÍSTICAS

María Isabel López Pumarega

## RESUMEN

**Palabras claves:** Emisión Acústica, fuentes, tubos, aceros, análisis de señales.

En el presente Trabajo de Tesis, se diseñó e implementó un sistema experimental para estudiar la Emisión Acústica (EA) producida durante la deformación triaxial de probetas en forma de aros. Se construyeron todos los componentes necesarios para los ensayos. Se diseñaron y construyeron distintos tipos de probetas, cortadas transversalmente de tubos de acero microaleado sin costura, usados en la industria petrolera, a fin de inducir distintas fuentes de EA (deformación, creación y propagación de fisuras, rotura de la capa de óxido). Se caracterizaron química, mecánica y metalográficamente los materiales de las probetas ensayadas. Las superficies de rotura de los materiales empleados, fueron observadas en un microscopio electrónico de barrido (MEB), identificándose los distintos tipos de fractura.

Se realizaron 22 ensayos, sirviendo los 10 primeros, para poner a punto todo el sistema de medición, eligiéndose los parámetros óptimos.

Se logró caracterizar cada tipo de probeta por el comportamiento medio de los parámetros Amplitud, Duración y Risetime de las señales de EA, obteniéndose una clara separación en "clusters". Esto permitiría en ensayos en campo sobre tubos similares, hacer una identificación general de las posibles fuentes de EA

No se encontró un comportamiento temporal definido en la evolución de los parámetros de las señales de EA, a medida que avanzaba cada ensayo. Estadísticamente se demostró que dentro de cada tipo de probeta, los ensayos son réplicas entre sí. Se calcularon los coeficientes de correlación entre los tres parámetros de las señales de EA, para todos los ensayos, encontrándose la mayor correlación entre la Amplitud y la Duración.

Para cada ensayo, se estudiaron estadísticamente las distribuciones de los parámetros Duración, Risetime y Amplitud. No encontrándose una única función de distribución que ajustase todos los histogramas experimentales de los dos primeros. En el caso de la Amplitud, primero, de acuerdo a la ley potencial, se obtuvieron valores del exponente comprendidos entre los citados en la literatura publicada. Luego, se encontró que una única función de distribución ajustaba todos los histogramas experimentales, dicha función fue la Log-normal, que ya aparecía citada en la literatura publicada.

Buscando alguna explicación física al hecho anterior, se analizó primero la influencia del sistema de detección, demostrándose que el transductor piezoeléctrico de banda ancha empleado para recoger la EA producida, mantiene la linealidad entre la amplitud de los impulsos mecánicos incidentes en el sensor (deformación de la superficie del material) y la amplitud de las señales eléctricas salientes (Amplitud de las señales de EA). Luego, se demostró, teniendo en cuenta el comportamiento estadístico de los fenómenos físicos involucrados, que las amplitudes de las deformaciones dentro del material obedecen a una distribución Log-normal. Teniendo en cuenta la linealidad del sistema de registro de la EA, se concluyó que las Amplitudes de las señales de EA deben seguir la misma distribución Log-normal.

Por último, se hacen algunos comentarios destinados a relacionar dos fenómenos que aunque ocurren a escalas muy diferentes, parecen responder a la misma dinámica, la E A a escala microscópica, y los terremotos a escala varios órdenes de magnitud mayor.

Finalmente, se sugiere para estudios posteriores, la aplicación de los nuevos conceptos como criticalidad auto-organizada, fractales y ruido  $1/f$  al fenómeno de la Emisión Acústica.

## STUDY OF ACOUSTIC EMISSION GENERATED BY TUBE DEFORMATION, ITS SOURCES AND CHARACTERISTICS

María Isabel López Pumarega

### ABSTRACT

**Key words:** Acoustic Emission, sources, tubes, steel, signal analysis.

In the present work, an experimental system to study Acoustic Emission (AE) during three-axial deformation of cylindrical seamless steel tubes was designed and constructed. The ring shaped samples, 14 cm outer diameter, 1 cm thick, 2 cm high, were made from transverse sections of seamless steel tubes. A section with a chord length of 7 cm was cut from each ring, in order to put it in a strain device which provided a distribution of stresses. The strain-producing force was manually exerted with a screw.

Some test pieces had a thin zone to induce local deformation, others had a notch to induce crack propagation, some of them had an oxide layer.

Twenty-two tests were carried out. The first ten of them served to calibrate the total system. Each piece was chemically, dimensionally, and mechanically characterized. Surface fracture was characterized with electronic microscopy.

The mean values of AE parameters, Amplitude, Duration and Risetime served to identify different types of test pieces, gathering them in different clusters. AE correlation parameters were calculated. No good correlation being settled, all parameters must be considered.

AE distribution parameters were studied. In case of Duration and Risetime a unique distribution function for all test could not be found. Amplitude distributions were studied with a potential law, and then all of them were better fitted with a Log-normal distribution function.

Looking for a physical explanation to this Amplitude Log-normal fit, the influence of the detection system was analyzed. It was shown that the AE sensor behaves linearly for mechanical inputs (surface deformation) and AE signal Amplitude outputs. Considering statistical physical process involved in AE sources, the Log-normal behaviour of mechanical inputs was justified. So because of sensor linearity, AE Amplitudes must follow a Log-normal distribution.

At the end, some comments are stated to relate two phenomena at different dimensional scales, AE at the microscopic one, and earthquakes at several orders of magnitude higher. Also future studies applying new concepts as self-organized-criticality, fractals, and  $1/f$  noise are suggested.

**Durante la elaboración de este Trabajo de Tesis, se hicieron varias publicaciones nacionales, y las siguientes internacionales con referato:**

- "Statistical analysis of Acoustic Emission events generated from a welded joint", M.I. López Pumarega, J.E. Ruzzante, " Proceedings of the 13<sup>th</sup>. World Conference of Nondestructive Testing ( 13<sup>th</sup> WCNDT) ", San Pablo, Brasil, 18 al 23 de octubre de 1992, Vol. I, pág. 55-59, editado por Elsevier Science Publishers B.V., Amsterdam, 1992.

- "Acoustic Emission Signal Analysis from Steel Tubes", M. I. López Pumarega, J. E. Ruzzante, "Proceedings of the 14th. World Conference on Non Destructive Test (14<sup>th</sup>.WCNDT)", New Delhi, India, 8 al 13 de diciembre de 1996, Vol. 4, pág. 2493-2496, editado por Oxford & IBH Publishing Co. PVT.LTD., New Delhi, 1996.

- "Analysis of Acoustic Emission Signal Parameters in Steel Tubes", M. I. López Pumarega, R. Piotrkowski, J. E. Ruzzante, "Ultrasonics and Acoustic Emission 35<sup>th</sup> International Conference on", Trest, República Checa, 14-18 de septiembre de 1998, a publicarse en los Proceedings.

- "Discussion of the Log-normal Distribution of Amplitudes in Acoustic Emission Signals", M. I. López Pumarega, R. Piotrkowski, J. E. Ruzzante, aceptado en diciembre de 1998 para su publicación durante 1999, en la Journal of Acoustic Emission, University of California, USA.

**En el desarrollo de este Trabajo de Tesis, el Laboratorio de Ondas Elásticas fue visitado por reconocidos expertos internacionales, a quienes quiero agradecer especialmente el valioso intercambio de ideas y el provechoso aporte de sugerencias:**

- Dr. Kangi Ono, Profesor de la Universidad de California, Los Angeles, Estados Unidos de Norteamérica.

- Dr. Sotirios J. Vahaviolos, President & CEO, Physical Acoustics Corporation, New Jersey, Estados Unidos de Norteamérica.

- Dr. Christopher Scruby, Manager, National NDT Centre, AEA Technology Energy, Oxfordshire, Reino Unido de Gran Bretaña e Irlanda del Norte, miembro del Comité Editorial de Insight (Journal of the British Institute of Non-Destructive Testing).

# ÍNDICE

<u>Título</u>	<u>Página</u>
<b>1. INTRODUCCIÓN</b>	<b>4</b>
1.1 - Generación de EA	6
1.2 - Propagación de ondas	7
1.2.1 - Atenuación	10
1.2.2 - Interfaces, reflexión y transmisión	11
1.2.3 - Localización de fuentes	12
1.3 - Detección y transductores	13
1.4 - Principios de instrumentación y análisis de datos	16
1.5 - El ruido	22
1.6 - Efecto Kaiser	23
1.7 - EA en metales	25
1.7.1 - EA por movimiento de dislocaciones	25
1.7.2 - EA por maclas de deformación	30
1.7.3 - EA por fractura y decohesión de inclusiones	32
1.7.4 - EA por fractura dúctil	34
1.8 - Fundamentación del trabajo	36
<b>2. DISEÑO EXPERIMENTAL</b>	<b>47</b>
2.1 - Descripción de los ensayos	47
2.2 - Dispositivo para abrir los aros	48
2.3 - Celda de carga	48
2.4 - Abertura de las mordazas	50
2.5 - Transductores de EA	50
2.5.1 - Sensor resonante	50
2.5.2 - Sensor de banda ancha	51
2.6 - Preamplificadores	51
2.7 - Sistema de EA	51
2.7.1 - Sección de traducción	52
2.7.2 - Sección de tratamiento individual de la señal	52
2.7.3 - Sección de gestión centralizada	52
2.7.4 - Sección elaboradora de datos	53
2.7.5 - Amplificadores	53
2.7.6 - Características eléctricas del AEDOS	54
2.7.7 - Características del software	54
2.7.8 - Datos de entrada	55
2.7.9 - Datos de salida	56
2.8 - Condiciones de trabajo en el equipo de EA	56
<b>3. RESULTADOS EXPERIMENTALES</b>	<b>63</b>
3.1 - Clasificación general de los ensayos	63

3.2	- Caracterización geométrica	65
3.3	- Caracterización química	67
3.4	- Caracterización mecánica	67
3.5	- Caracterización metalográfica	67
3.5.1	- Material 1	68
3.5.2	- Material 2	68
3.6	- Resultado de los ensayos	69
3.6.1	- Ensayo 11	69
3.6.2	- Ensayo 12	70
3.6.3	- Ensayo 13	70
3.6.4	- Ensayo 14	71
3.6.5	- Ensayo 15	71
3.6.6	- Ensayo 16	71
3.6.7	- Ensayo 17	72
3.6.8	- Ensayo 18	72
3.6.9	- Ensayo 19	72
3.6.10	- Ensayo 20	73
3.6.11	- Ensayo 21	73
3.6.12	- Ensayo 22	74
<b>4.</b>	<b>DISCUSIÓN</b>	<b>110</b>
4.1	- Valores medios de la EA	111
4.2	- Estudio temporal de los parámetros	112
4.3	- Valores de correlación	113
4.4	- Comparación de los parámetros	114
4.5	- Agrupamiento de los ensayos en clusters	115
4.5.1	- Análisis estadístico dentro de cada tipo de ensayo	115
4.5.2	- Interpretación en cada tipo de ensayo	117
4.6	- Distribución de la Duración	119
4.7	- Distribución del Risetime	120
4.8	- Distribución de la Amplitud	122
4.8.1	- Ley potencial	123
4.8.2	- Estudio de la distribución Log-normal	124
4.8.2.1	- Influencia del sistema de detección	125
4.8.2.2	- Interpretación de los resultados	127
<b>5.</b>	<b>CONCLUSIONES</b>	<b>147</b>
<b>6.</b>	<b>REFERENCIAS</b>	<b>150</b>
6.1	- Del Capítulo 1	150
6.2	- Del Capítulo 2	152
6.3	- Del Capítulo 3	152
6.4	- Del Capítulo 4	152
<b>7.</b>	<b>AGRADECIMIENTOS</b>	<b>155</b>
<b>8.</b>	<b>APÉNDICE</b>	<b>156</b>



## 1. INTRODUCCIÓN

*El presente Trabajo de Tesis se divide en 8 Capítulos. Al comienzo de cada uno se indica muy brevemente su contenido.*

*Las figuras de cada Capítulo, fueron agrupados al final de cada uno de ellos. En los gráficos y figuras que fueron copiadas de la literatura publicada, se indica la correspondiente referencia. Todas las referencias bibliográficas fueron agrupadas en el Capítulo 6.*

*El Capítulo 1 sirve de introducción general al tema de la Emisión Acústica, y más detalladamente a la Emisión Acústica en metales. Al final del mismo, se dan los antecedentes del Grupo de Laboratorio donde se llevó a cabo la presente investigación y la fundamentación del tema elegido.*

La *Emisión Acústica* (EA) es una onda de sonido generalmente no audible, es decir, una onda de energía elástica que viaja a través de un material, como resultado de la rápida liberación de energía de deformación. Podemos "oír" el sonido de una fisura cuando se está propagando, podemos, incluso, "oír" el sonido asociado con la deformación plástica que se produce en la punta de una fisura aún antes de su propagación. La fuente de la energía de la EA proviene de la variación del campo de tensiones dentro del material mismo. Sin tensión no hay emisión<sup>[1-1]</sup>.

Si hay una rápida liberación de energía dentro de un sólido, causada por ejemplo, por el crecimiento de una fisura, entonces parte de la energía es disipada en forma de ondas elásticas (ver figura 1.1). Generalmente la proporción de energía que se libera como ondas elásticas, depende de la naturaleza de la fuente, cuán localizada esté y cuán rápidamente se produzca dicha liberación. Dentro de un material, la liberación rápida de energía localizada, da origen a ondas elásticas en el rango de las frecuencias ultrasónicas, que pueden ser detectadas por "micrófonos" o transductores colocados en la superficie del mismo, siempre que dichas ondas tengan la suficiente amplitud.

Hasta aproximadamente los años 80, el interés en la EA estaba focalizado en su aplicación como técnica de Ensayos No Destructivos (END), siendo la mayoría de las señales asociadas con la propagación de fisuras. Luego se ampliaron sus aplicaciones a la ciencia de los materiales y fue usada como herramienta de diagnóstico. La siguiente lista, aunque incompleta, muestra algunos de los procesos incluidos en las aplicaciones actuales de la EA:

- *Degradación de materiales:* crecimiento de defectos, avance de fisuras, deformación plástica, fractura de inclusiones o precipitados; degradación de superficies, como corrosión o falla de recubrimientos, etc..
- *Procesos reversibles:* transformaciones de fases cristalográficas, fusión o solidificación, efectos termoelásticos, movimiento de las paredes de los dominios ferromagnéticos o ferroeléctricos, fricción entre superficies.

- *Procesos de fabricación*: ruido durante una soldadura, incluyendo la formación de defectos, rolado, forjado, maquinado, tamizado y mezclado de polvos, secuenciado de válvulas.
- *Pérdidas y flujo*: flujo de partículas y fluidos de una o dos fases, pérdidas, evolución de gases, ebullición<sup>[1-1]</sup>.

La EA es un fenómeno natural que ocurre en el más amplio rango de materiales, estructuras y procesos. La EA de máxima escala, está relacionada con los eventos sísmicos, mientras que los procesos de la más pequeña escala que han sido observados con EA, corresponden al movimiento de dislocaciones en metales tensionados. Entre ambos hay un amplio rango de estudios de laboratorio y de ensayos industriales<sup>[1-2]</sup>.

Generalmente se incluye como fuentes de EA, todas las fuentes de sonido dentro del material, que están espacialmente localizadas y entran en el rango de frecuencias del ancho de banda normal de los detectores de EA, por encima de los 20 KHz, y por lo tanto son ultrasónicas. La mayoría de los sucesos son, estrictamente hablando, transitorios, dando lugar a "*explosiones*" ("bursts") o "*eventos*" de energía ultrasónica, y aún aquellos que parecen *continuos*, como los producidos por el movimiento de dislocaciones o el tamizado de polvos, son mayoritariamente superposiciones de un gran número de sucesos transitorios (explosiones), superpuestos. La figura 1.2 muestra los dos tipos de EA. Las vibraciones (baja frecuencia) de un cuerpo no están incluidas, mientras que el ruido de válvulas, sí se incluye porque es transitorio y localizado. Aunque el ruido producido por un flujo es continuo más que transitorio, los sensores y la instrumentación de EA frecuentemente lo monitorean y por lo tanto sí es incluido<sup>[1-1]</sup>.

El rango de frecuencias abarcado por la EA, tomado así por razones prácticas, va aproximadamente desde 20 KHz hasta 1 MHz. El límite inferior se elige así para dejar afuera las vibraciones, y el superior se debe a que por encima de este valor es muy importante la atenuación. En la figura 1.3 se puede apreciar el rango de frecuencias de los distintos movimientos ondulatorios incluyendo la EA.

Típicamente, una inspección global con EA sobre una gran estructura, se usa para identificar las áreas con problemas, y con el uso de otras técnicas de END, se identifica más precisamente la naturaleza de los defectos que están produciendo la EA. Es ésta una de las más importantes ventajas de la EA como técnica de END, ya que empleando la cantidad adecuada de sensores, un único ensayo de prueba hidráulica, permite conocer y sobre todo, ubicar las zonas potencialmente peligrosas de toda una gran estructura.

La EA es una técnica mucho más joven que otras técnicas de END como el ultrasonido o la radiografía. Kaiser<sup>[1-3]</sup> en 1953, realizó el primero y quizás uno de los más completos estudios de laboratorio sobre la EA. Luego, la primer aplicación documentada del uso de la EA se llevó a cabo en 1963, durante el ensayo del receptáculo de los motores de un cohete<sup>[1-4]</sup>. Si bien los primeros trabajos sistemáticos sobre EA en metales, datan de la década del 50, hay algunos casos particulares que son conocidos por los metalurgistas desde hace muchos años, tal es el caso del estaño, cuyo primer antecedente escrito, en América, data de 1640: "... y el estridor que se siente cuando se muerde o quiebra..."<sup>[1-5]</sup>.

En épocas más recientes se usó la EA en diversas industrias<sup>[1-6]</sup> y también para monitorear recipientes de presión durante la prueba hidráulica. Más tarde la industria

nuclear tuvo sus requerimientos para una técnica que podía detectar y localizar defectos incipientes<sup>[1-7, 1-8]</sup>. La industria petroquímica también usó esta técnica para ensayos de componentes presurizados. Los ensayos de recipientes de plásticos reforzados con fibras de vidrio han sido particularmente exitosos<sup>[1-9, 1-10]</sup>. También se usa la EA para el monitoreo estructural en la industria aeroespacial. Más recientemente, la EA ha sido identificada como potencialmente muy útil en el monitoreo continuo de estructuras "offshore"<sup>[1-11]</sup>. En los últimos años la EA comenzó a ser explotada en un gran número de aplicaciones de monitoreo en los procesos de fabricación<sup>[1-12]</sup>. El monitoreo de la fabricación de soldadura se desarrolló por varios años<sup>[1-13]</sup>, y más recientemente se comenzó a monitorear varios procesos de maquinado<sup>[1-14]</sup>.

La EA ha probado ser en sí misma, una valiosa herramienta de ensayo en el laboratorio<sup>[1-15]</sup>. Cuando se usa en conjunción con otras técnicas metalúrgicas y de análisis de materiales, la EA ha permitido que avanzara la comprensión de los procesos de deformación y fractura.

En tiempos más recientes se ha desarrollado la comprensión de los procesos físicos involucrados en la EA. Debido a que algunos aspectos de la técnica, particularmente la propagación de las ondas elásticas en sólidos finitos, son intrínsecamente dificultosos, la comprensión física y su base teórica han retrasado a menudo, las aplicaciones prácticas de la EA.

El término EA se usa para describir, tanto el fenómeno en sí mismo, como la técnica en la cual el fenómeno está basado. La mayoría de las técnicas de END usan las ondas electromagnéticas (desde los rayos  $\gamma$  y los rayos X de alta frecuencia, a través de la luz visible, hasta las bajas frecuencias de los métodos magnéticos y de las corrientes de Eddy), y las ondas de sonido de alta frecuencia (ultrasonido en sus varias formas). La EA cae en esta segunda categoría, aunque hay diferencias muy importantes entre la EA y las otras técnicas de END. La EA difiere de las otras técnicas de END en dos aspectos claves. Primero, la señal tiene su origen en el material mismo, no en una fuente externa. Segundo, la EA detecta defectos en movimiento, por lo tanto es un fenómeno dinámico, mientras que la mayoría de las otras técnicas sólo detecta discontinuidades estáticas<sup>[1-2]</sup>.

## **1.1 - Generación de EA**

La fuente productora de ondas elásticas (EA) es un suceso dentro del cuerpo. En muchos casos no es un asunto trivial entender cuál es la fuente productora de EA, o cuáles son sus mecanismos.

En el caso de una fisura que está creciendo, la formación de nuevas superficies en la fisura debe ser acompañada por repentinos cambios en la tensión y el desplazamiento del material en la vecindad de la fisura. Las deformaciones y las tensiones variables deben actuar por definición, como fuentes de ondas elástica de tensión (figura 1.4). Si el cambio de tensiones es grande y rápido, se irradian desde la fisura, ondas elásticas de gran amplitud, llevando una parte importante de la energía

de la fuente. Éste sería el caso de una fisura frágil (figura 1.5 (a)). En el caso del crecimiento de una fisura dúctil (figura 1.5 (b)), gran parte de la energía se va en mover dislocaciones en la creciente zona plástica asociada con la fisura. Este crecimiento lento frena la fisura y previene su crecimiento catastrófico. Resulta obvio que en este tipo de fisura hay menos energía disponible para irradiar ondas elásticas. Scruby<sup>[1-16]</sup> demostró que es la velocidad de liberación de energía, es decir la velocidad de avance de la fisura, más que la energía, lo que controla la amplitud de las señales de EA. Esto confirma que el crecimiento de una fisura frágil debería ser siempre fácilmente detectable (figura 1.5 (a)), mientras que las fisuras dúctiles, más lentas, pueden ser escasamente detectables (figura 1.5(b)), a no ser que haya otros factores involucrados tales como la amplificación por una gran prefisura, o que los incrementos de la fisura sean muy grandes<sup>[1-1]</sup>.

La deformación plástica puede producir fuentes adicionales de EA que pueden ser detectables, aún si no hay crecimiento de la fisura dúctil. El mecanismo más probable es la fractura de inclusiones o su decohesión de la matriz, cuando la zona plástica pasa a través de ellas. De todos modos raramente son eventos muy energéticos. Dependiendo del tratamiento térmico del material, pueden algunas veces ser intensos.

En el ambiente de una industria, hay varios factores que pueden hacer que una fisura produzca EA más "intensa". Por ejemplo, grandes defectos preexistentes que actúen como resonadores, amplificando la EA; regiones de diferente rigidez y composición, debido a soldaduras o tratamientos térmicos que pueden producir zonas más frágiles; efectos del medio ambiente que pueden causar corrosión o fragilización, todos tienden a aumentar la EA.

Todas estas fuentes están directamente asociadas con la acumulación de daño en el material. Generalmente se las llama *fuentes primarias* (figura 1.6). Las fisuras grandes pueden también generar EA bajo carga de fatiga cuando sus superficies rozan entre sí, éstas se conocen como *fuentes secundarias* (figura 1.6), ya que ellas mismas no indican avance de la fisura. De todos modos son muy útiles en la detección de fisuras. Un ambiente corrosivo realza las fuentes de EA secundarias.

## **1.2 - Propagación de ondas**

La onda primitiva liberada en la fuente de EA es esencialmente un pulso de tensión correspondiente a un desplazamiento del material. Su evolución temporal puede verse en la figura 1.7. La forma de la onda de desplazamiento es básicamente una función escalón, correspondiente a un cambio asociado con el proceso de la fuente. La forma de las ondas correspondientes a la velocidad y la tensión son básicamente del tipo pulso. El ancho y la altura del pulso primitivo dependen de la dinámica del proceso de la fuente. Los procesos de las fuentes, tales como saltos microscópicos de fisuras y fracturas de inclusiones, a menudo se completan en unos pocos microsegundos o fracciones de microsegundos, de modo que el correspondiente pulso primitivo es de muy corta duración. La amplitud y la energía del pulso primitivo varían en un enorme rango, desde muy bajo en movimiento de dislocaciones, a muy

altos en saltos de fisuras. La onda primitiva irradia desde la fuente en todas direcciones, teniendo a menudo una gran direccionalidad, dependiendo de la naturaleza del proceso de la fuente.

El camino trazado por una partícula bajo la influencia de una onda acústica, puede generalmente ser representado por una elipse, con uno de sus ejes orientados a lo largo de la dirección de viaje de la onda. El tipo de onda está determinado por la relación entre el movimiento de la partícula y la dirección de propagación de la onda.

Las ondas que viajan en un medio "infinito", con dimensiones mucho mayores que la longitud de la onda, homogéneo e isótropo, son llamadas *ondas de volumen*. Hay dos tipos de estas ondas, las *longitudinales*, de compresión, y las *transversales* de corte. En ambas ondas, el eje menor del camino elíptico colapsa a cero, resultando en un movimiento oscilatorio lineal. Las *ondas longitudinales*, son ondas donde el movimiento de las partículas es paralelo a la dirección de propagación de la onda; las *ondas transversales*, tienen el movimiento de las partículas perpendicular a la dirección de propagación. En la figura 1.8 están ilustrados estos tipos de ondas. Ya que los movimientos relativos de las partículas, en estas ondas son diferentes, las constantes elásticas, y por lo tanto las velocidades serán también distintas. Generalmente la velocidad de las ondas longitudinales, es ligeramente menor que el doble de la velocidad de las ondas transversales ( $v_l \approx 2 v_t$ ). Las ondas a menudo tienen ambas componentes, longitudinales y transversales, y cada una viaja a su velocidad. En un medio no atenuante y no dispersivo, una onda transitoria, vista a cierta distancia del punto de origen (ver figura 1.9), puede parecer como dos ondas separadas, una longitudinal y otra transversal.<sup>[1-17]</sup>

La anisotropía de las fuerzas de unión entre los átomos en la superficie de un sólido acotado, puede producir otros tipos de ondas adicionales. Una *onda de superficie* tiene su máxima amplitud en la superficie del sólido, con amplitud decreciente con la distancia desde la superficie. El plano de la elipse de movimiento de la partícula puede ser paralelo a la superficie (*ondas de Love o de placas*), o perpendicular (*ondas de Rayleigh*). De todos modos, debido a que la mayoría de los sensores de EA detectan movimiento perpendicular a la superficie, la componente paralela raramente es vista. La velocidad de las ondas de Rayleigh es ligeramente menor que la velocidad de las ondas transversales ( $v_R \approx v_t$ ).

Si el sólido está acotado por dos superficies, de modo que es una placa, y su espesor es del orden de unas pocas longitudes de onda o menos, se pueden producir las *ondas de placa* u *ondas de Lamb*. Una onda de Lamb, está en realidad compuesta por dos ondas de superficie sincronizadas, las cuales pueden ser sincronizadas simétrica o antisimétricamente. El movimiento de las partículas en las ondas de Rayleigh y en las de Lamb, se muestra en la figura 1.10.

Las ondas de volumen, de superficie y de placas, son los tipos más importantes de ondas vistos en el campo de la EA. De todos modos, estos no son los únicos tipos de ondas que se puede encontrar en sólidos. En general los sólidos acotados con geometría moderadamente simétrica, pueden soportar un único tipo de ondas.

La frecuencia ( $\nu$ ), la longitud de onda ( $\lambda$ ), y la velocidad de fase ( $v$ ), están vinculadas por la relación:  $v = \lambda \cdot \nu$ . Para medios no acotados, y ondas de superficie sobre una única superficie, esta velocidad es la única que existe y es independiente de la frecuencia. De todos modos, todas las ondas que viajan en medios acotados, donde las dimensiones físicas están dentro del orden de magnitud de la longitud de onda

acústica, son dispersivas, es decir, la velocidad de fase es función de la frecuencia. Si dentro de una onda de EA están presentes varias de estas componentes, que viajan a distintas velocidades, la forma de la onda cambiará a medida que viaja por el medio.

La energía en un paquete de onda, no viaja a la velocidad de fase, sino a la velocidad de grupo. En ausencia de dispersión, estas dos velocidades coinciden, pero en la mayoría de los sólidos acotados, la velocidad de grupo será menor que la velocidad de fase. Esto puede tener efectos reales en la EA cuando se está intentando hacer una localización de fuentes midiendo las diferencias de los tiempos de arribo a dos o más sensores<sup>[1-17]</sup>.

La forma de la onda primitiva cambia mucho durante la propagación a través del medio, en general la señal emergente desde el sensor tiene muy pocas semejanzas con el pulso original. Esta transformación de la onda de EA tiene mucha importancia para los investigadores interesados en el análisis de las fuentes, y para los inspectores interesados en el ensayo de estructuras. El investigador que quiere determinar la forma original de la onda de la fuente usará sensores de banda ancha y requerirá un análisis detallado de la primera parte de la señal. La mayoría de los investigadores en materiales, así como los inspectores de END, están interesados en los aspectos estadísticos de la actividad de EA y no necesitan conocer detalles precisos de cada señal. Para ello usan sensores de banda angosta o resonantes, que sólo miden algunos aspectos de la onda, pero pueden procesar cientos de señales por segundo<sup>[1-2]</sup>.

La relación entre el pulso fuente y el movimiento resultante en el punto de detección es muy complicada. Aún con la geometría y la fuente más simple, como ya se vio, la forma de onda resultante es muy compleja. En el caso de una placa es más complicado aún, ya que la segunda superficie juega su rol en la elastodinámica del proceso de propagación de las ondas. Además, la función de la fuente no es de tipo "pulso", en realidad será una fuerza dipolar y/o una doble cupla, más que una fuerza puntual, siendo en general su orientación desconocida, y tanto las componentes verticales como horizontales necesitan ser consideradas. Estas son complicaciones, que dificultan el desarrollo de una teoría matemática, y las correspondientes técnicas experimentales que permitan calcular el modelo matemático de las fuentes de EA<sup>[1-2]</sup>.

Como se vio, la propagación de las ondas elásticas en sólidos finitos es muy compleja. Si la fuente es interna, irradia ondas de sonido que se propagan en todas las direcciones hasta los límites del cuerpo. En general serán ondas de compresión y de corte. Estas ondas pueden a menudo ser detectadas directamente por transductores colocados sobre su superficie. Estas ondas directas, estarán seguidas por una serie de ecos y reberveraciones dentro del cuerpo, que a menudo se superponen y hacen que la interpretación de los datos sea muy difícil. Los análisis teóricos sólo son posibles en geometrías muy sencillas. La situación es aún más complicada, por el hecho de que la mayoría de las fisuras reales en las estructuras, son suficientemente grandes como para que no se las pueda considerar puntuales y es necesario tener en cuenta sus dimensiones. Se han hecho intentos con métodos analíticos<sup>[1-18]</sup> y numéricos<sup>[1-19]</sup> para calcular las emisiones producidas por la extensión de fisuras finitas. En algunos casos muy particulares, simplificar el problema de una fisura real en sólidos finitos, asumiendo una fuente puntual localizada, y aplicar un factor de corrección, es a veces una alternativa aceptable.

Particularmente en grandes estructuras, los transductores tienen que ser colocados a distancia relativamente grandes de las posibles fuentes de EA, en estos

casos la mayor parte de la energía ultrasónica que les llega, lo hace en forma de ondas de superficie (Rayleigh) y ondas de placas (Lamb). Estas últimas se generan durante la conversión de modo que se produce cada vez que las ondas de volumen llegan a un contorno. Hay algunas ventajas en esta conversión de energía en ondas de superficie y de placas, principalmente porque la atenuación de las ondas de Rayleigh es menor, debido a la dispersión bidimensional más que tridimensional. Cuando se incrementa la distancia desde la fuente, las ondas de Rayleigh pronto dominan la forma de onda en la superficie de la placa. En placas delgadas, las ondas de Lamb, específicamente el modo antisimétrico, tienden a ser dominantes. Las ondas de Rayleigh son ideales para técnicas de localización bidimensional de fuentes. De todos modos es difícil deducir la forma de las ondas elásticas que abandonan una fuente, una vez que la energía ha sido convertida en ondas de superficie y de placas, y así caracterizar la fuente. Más aún, es difícil deducir la profundidad de la fuente de EA, a partir de las ondas de superficie y de placas. El cuerpo como un todo, actúa acústicamente como un complejo sistema de filtro resonante, sea una pequeña muestra de laboratorio o una gran estructura. Una fuente transitoria de banda ancha tiende a excitar los modos normales de la muestra, cuyas frecuencias dependen de sus dimensiones. A pesar de todo, hay un beneficio, generalmente se gana en sensibilidad para los pequeños eventos, debido a que el rango de frecuencias del detector, es ajustado a las frecuencias generadas en el espécimen. De todos modos hay una inevitable pérdida de ancho de banda, de modo que es más difícil caracterizar el proceso de la fuente en sí mismo.

Mientras que el análisis de la función fuente utiliza sólo la primera parte de la forma de onda de EA, la mayor parte de la tecnología de EA analiza la onda completa. La última parte de esta onda está formada por muchas componentes que llegan al sensor por diferentes caminos. Típicamente, el pico más alto de la onda, no es producido por la primera componente, sino por la interferencia constructiva de varias de las últimas componentes. La onda de EA rebota en las superficies del material, excitando repetidamente el sensor hasta que finalmente decae. Este proceso de decaimiento toma del orden de 100  $\mu$ s en un sensor altamente amortiguado, o décimas de milisegundos en uno poco amortiguado, mucho más que el evento fuente, que usualmente finaliza en unos pocos microsegundos o menos<sup>[1-2]</sup>.

Es muy importante comprender que la forma de la onda que recibe el sensor de EA, es fundamentalmente el resultado de todo este complejo proceso de propagación.

### 1.2.1 - Atenuación

Otro aspecto importante de la propagación de las ondas es la atenuación. La *atenuación* es la pérdida de la amplitud original, debido a factores geométricos y al amortiguamiento del material por donde viajan las ondas. Cuando un paquete de ondas se propaga desde la fuente, el contenido de energía permanecerá constante en ausencia de mecanismos de disipación. De todos modos si el frente de onda del paquete se expande desde la fuente, la energía por unidad de volumen del paquete debe decrecer, de modo que la energía total se conserve. La velocidad de esta disminución dependerá de la geometría del medio. En tres dimensiones, la energía por

unidad de volumen decrecerá como el cuadrado de la distancia desde la fuente, mientras que en dos dimensiones, la energía por unidad de volumen decrecerá como esa distancia. Si el paquete es confinado a una dimensión, como en la propagación en una barra, la energía por unidad de volumen será independiente de la distancia desde la fuente<sup>[1-17]</sup>.

Normalmente cuando se piensa en ondas acústicas, uno supone una onda viajando en una única dimensión, es decir, una onda plana. Por lo tanto, el efecto geométrico antes mencionado sobre la energía del paquete de onda se ignora. De todos modos en un ensayo de EA, en los que ni la localización de las fuentes ni la geometría de la estructura están bajo control del investigador, este efecto geométrico deberá ser incluido en cualquier intento de medir la energía del paquete de onda.

La atenuación de una onda plana surge de los mecanismos disipativos o de la dispersión cuando la onda se propaga. En un medio homogéneo, esta pérdida usualmente ocurre como un porcentaje fijo de la energía del paquete de onda por unidad de longitud de desplazamiento. Matemáticamente es una disminución exponencial de la amplitud de la onda con la distancia, puede expresarse como:

$$A = A_0 \exp(-\alpha x) \quad \text{ó} \quad A = A_0 \exp(-\beta t) \quad (1.1)$$

donde  $\alpha$  es la *constante de atenuación por unidad de longitud*, y  $\beta$  es la *constante de atenuación por unidad de tiempo*. Las dos constantes están relacionadas por la velocidad acústica ( $v$ ):

$$\beta = \alpha v \quad (1.2)$$

Hay muchos mecanismos de atenuación acústica, la mayoría tiene alguna forma de dependencia con la frecuencia. Afortunadamente en el rango normal de frecuencia de la EA, 50 KHz a 1 MHz, ambos, la dependencia con la frecuencia y la magnitud de muchos de estos mecanismos de atenuación, es pequeña en los materiales estructurales. Sólo en los materiales compuestos y en los materiales geológicos, la atenuación es un factor verdaderamente limitante en los ensayos de EA<sup>[1-17]</sup>.

Pero, debe tenerse en cuenta que la atenuación gobierna la detectabilidad a la distancia, y es por lo tanto un factor importante en la elección de la posición de los sensores y su espaciamiento en una gran estructura.

### 1.2.2 - Interfaces, reflexión y transmisión

Si una onda plana golpea una superficie entre dos medios de diferente impedancia acústica, parte de la onda es reflejada ( $a_R$ ) y parte es transmitida ( $a_T$ ). La intensidad de estas componentes está dada por:



$$a_R = (Z_1 - Z_2)^2 / (Z_1 + Z_2)^2 \quad a_T = 4 Z_1 Z_2 / (Z_1 + Z_2)^2 \quad (1.3)$$

donde los  $Z_i$  son las impedancias acústicas de los materiales. Se debería notar que estas ecuaciones se aplican a las ondas que entran perpendicularmente a las interfaces y son simétricas; no importa en qué medio la onda esté viajando cuando golpea las interfaces. La diferencia en las impedancias acústicas puede resultar en grandes diferencias en las intensidades acústicas transmitidas a través de las interfaces.

Cuando una onda plana golpea la interfaz, los ángulos de las ondas reflejadas y transmitidas están gobernados por la ley de Snell:

$$\text{sen } \theta_1 / v_1 = \text{sen } \theta_2 / v_2 \quad (1.4)$$

donde  $\theta_1$  es el ángulo de incidencia y  $\theta_2$  el ángulo de reflexión o refracción, y las  $v_i$  son las velocidades en los materiales. En la ecuación ( 1.4 ) la velocidad de la onda transmitida es positiva y la de la onda reflejada es negativa.

El movimiento de una partícula en cualquier parte del frente de onda de una onda plana es el mismo. De todos modos en una interfaz, la dirección de propagación cambiará, aunque no lo haga el movimiento de la partícula. Para una onda perpendicular a la superficie (  $\theta_1 = 0^\circ$  ), esto produce un cambio de fase de  $180^\circ$  en el movimiento relativo de la partícula con respecto a la dirección de propagación de la onda. Para ángulos de incidencia no perpendiculares, las ondas reflejada y transmitida, tendrán componentes longitudinales y transversales (a no ser que el movimiento de la partícula sea paralelo a la interfaz), debido al cambio en el ángulo entre el movimiento de la partícula y la dirección de propagación. El proceso de generar ambos modos de ondas de volumen, después de la reflexión y la refracción se conoce como *conversión de modo*. En la EA, donde no hay control del camino de la onda, el casi inevitable resultado de la conversión de modo es que la onda que alcanza el sensor, está compuesta de ambas componentes, longitudinal y transversal. En la mayoría de las situaciones, las ondas de superficie también están presentes. Ya que la conversión de modo ocurre en casi todas las reflexiones, es un proceso casi continuo en la propagación de ondas en un medio finito. Debido a la continua transformación de modos viajando a distintas velocidades, la onda transitoria se alarga en el tiempo mientras viaja, en vez de separarse en componentes longitudinal y transversal como se ve en la figura 1.9.

### 1.2.3 - Localización de fuentes

La velocidad de propagación de las ondas es un aspecto fundamental cuando se usa la tecnología de EA para la localización de fuentes. Debe destacarse, que sólo es posible hacerla para señales discretas, tipo impulso ("burst"), ya que se tiene en cuenta las diferencias de tiempos de arribo de una misma señal a los distintos sensores. Es

particularmente importante cuando se ensayan grandes estructuras, en las cuales la EA sirve para identificar las regiones activas, para luego ser inspeccionadas con otras técnicas de END. El caso de señales continuas se trata posteriormente.

Hay varias estrategias para la localización de fuentes. La *localización zonal* ubica la fuente dentro de un área relativamente grande, indicando el primer sensor que recibió la señal. La *localización puntual* ubica la fuente con precisión, calculando la posición a partir de las diferencias de tiempos de arribo de una misma señal a varios sensores. La velocidad de propagación está involucrada en todos estos cálculos. La exactitud de los mismos, está gobernada por los procesos de propagación de la onda y depende de factores tales como la geometría, el espesor del material y el fluido contenido por la estructura. Estos factores producen incertezas en la velocidad de propagación y esto conduce a errores en la localización. En casos favorables, la mejor exactitud es mejor que el 1% de la distancia entre los sensores, en casos desfavorables, peor que el 10%<sup>[1-2]</sup>.

El caso unidimensional es el más simple, de este modo se pueden ubicar fisuras en tubos. Un reloj electrónico determina la diferencia de tiempo entre la llegada del pulso al primer sensor y al segundo. Conociendo la velocidad de propagación de la onda, la distancia entre los sensores y la diferencia de tiempos de arribo, se ubica matemáticamente la fuente.

El caso plano (bidimensional), es un poco más complejo. Si sólo se quiere ubicar la fuente, se necesitan 3 sensores, pero si además se quiere conocer el tiempo en que se produce cada emisión, se deben usar 4 sensores como mínimo. En la figura 1.11, se indica la ubicación con tres sensores ( $S_1$ ,  $S_2$ ,  $S_3$ ). Si tomamos dos de ellos,  $S_1$  y  $S_2$ , la diferencia de tiempo de arribo, multiplicada por la velocidad de propagación, da la diferencia de distancia desde los sensores al punto fuente. Por lo tanto, el lugar geométrico de los puntos cuyas diferencia de distancias a los dos sensores es constante, se ubica sobre una hipérbola. Esto indica que la fuente se encuentra en algún punto de las hipérbolas cuyos focos son los sensores  $S_1$  y  $S_2$ , existiendo un único punto que pertenece a ambas hipérbolas y que es la fuente de EA.

La ubicación exacta puede ser llevada a cabo simultáneamente con el arribo de la señal, para su presentación en la pantalla de la computadora, permitiendo saber, cuáles son los puntos activos de la estructura en cada instante<sup>[1-20]</sup>.

En el caso de fuentes que emiten ondas continuas, no se puede determinar la diferencia de tiempo de arribo por medio de relojes electrónicos, ya que no se puede identificar cuándo empieza la perturbación. Esta dificultad se puede corregir empleando la técnica matemática de autocorrelación de funciones, que permite evaluar diferencias de tiempos entre dos señales continuas. El paso siguiente es hallar la posición de la fuente conociendo la velocidad de propagación de la onda. Esta técnica se aplica por ejemplo para ubicar pérdidas en tuberías<sup>[1-20]</sup>.

### **1.3 - Detección y transductores**

Para detectar los eventos de EA, es necesario alguna forma de transductor o sensor que convierta el pequeñísimo desplazamiento de la superficie (del orden de  $1 \text{ pm} = 10^{-12} \text{ m}$ )<sup>[1-1]</sup>, en señales eléctricas que puedan ser amplificadas y registradas. Los más ampliamente usados dependen del efecto piezoeléctrico. Los transductores piezoeléctricos son sensibles, fáciles de aplicar sobre la superficie de la muestra, baratos y además su tecnología es ampliamente conocida en ultrasonido y EA. Deben estar en contacto íntimo con el espécimen, para ello se usa un acoplante como grasa u otro fluido no atenuante y se los asegura con sujetadores magnéticos, o cintas de goma.

En ciertas ocasiones, por ejemplo en caso de alta temperatura, es necesario usar guías de onda, un extremo en contacto con la superficie del cuerpo en estudio, y el otro acoplado al sensor. Para estudios especiales, tales como calibración y alta temperatura, se usa otro tipo de transductores, incluyendo sensores ópticos y capacitivos. Ambos son menos sensibles, más caros y más difíciles de usar. La mayoría de los sensores piezoeléctricos, como los usados en EA, tienen el elemento sensible en forma de un disco de material piezoeléctrico. Generalmente son cerámicos de titanato zirconato de plomo, (PZT). Si este disco no está amortiguado de ninguna manera, actúa como un resonador para las ondas elásticas incidentes, de modo que la fuerza electromotriz inducida es típicamente una senoide que decae, y su frecuencia principal está determinada por el espesor del elemento. También hay resonancias radiales a más bajas frecuencias. En la figura 1.12 se puede ver un esquema de este tipo de transductor<sup>[1-1]</sup>.

Las frecuencias elegidas para la mayoría de los sensores resonantes están en el rango de 100 KHz a 1 MHz. Éstas se ajustan bien para materiales con espesores entre unos pocos milímetros y fracciones de metro, ya que el espesor controla la resonancia de la muestra y las frecuencias de las ondas de Lamb dominantes. Cuando se elige un sensor para una determinada aplicación, es muy ventajoso optimizar la sensibilidad ajustando las frecuencias de trabajo. Los transductores de EA de banda ancha, generalmente están formados por un cristal piezoeléctrico cuya frecuencia natural de resonancia, está en el límite superior o por encima de la banda de paso de interés. Así, para monitorear en el rango de 100 KHz a 1 MHz, se puede elegir una frecuencia de resonancia de 1 a 2 MHz. Para obtener una respuesta razonablemente plana, se amortigua el resonador, usando un medio atenuante, como por ejemplo epoxy (usualmente cargado con tungsteno para ajustar su impedancia)<sup>[1-1]</sup>.

Una desventaja de usar elementos con forma de disco, es que tienden a mantener su respuesta de banda ancha sólo para las ondas incidentes perpendiculares a su superficie, ya que la interferencia destructiva distorsiona la respuesta y reduce el ancho de banda en otras orientaciones. Este efecto es insignificante a bajas frecuencias, a no ser que el transductor sea muy grande (la longitud de onda de las ondas de Rayleigh en aceros a 100 KHz, son del orden de 30 mm)<sup>[1-1]</sup>.

Además de los factores relacionados con la propagación de la onda, anteriormente mencionados, la recepción de una onda simple, es transformada posteriormente por la respuesta del transductor. Cuando un cristal resonante es excitado con un pulso transitorio de banda ancha, éste oscila con sus frecuencias propias de resonancia (gobernadas por su forma y tamaño). Por lo tanto, la señal eléctrica a la salida del sensor es la sumatoria de todos estos efectos, lo que hace que la señal de EA sea muy compleja.

Normalmente es ventajoso usar sensores resonantes para mejorar la sensibilidad. En realidad sólo hay una ganancia significativa si el ancho de banda de la señal es mucho menor que el ancho de banda del ruido. Si se desea hacer un análisis de la forma de onda de las señales, entonces se deben usar sensores de banda ancha<sup>[1-1]</sup>.

Todos los fabricantes de sensores, proporcionan curvas de calibración de los mismos. Las unidades más corrientemente usadas son dB referido a 1V/m/s y dB referido a 1V/  $\mu$ bar ( $1\text{dB} = 20 \text{ Log} ( V/V_0 )$ .) Las curvas de calibración se presentan como gráficos de Amplitud (en dB) en función de la frecuencia (en KHz o MHz). La señal de EA usada para calibrar el sensor puede ser o una onda de superficie o una onda de compresión. En la figura 1.13 se muestra una curva de calibración típica. Las curvas de calibración de un mismo sensor, no serán las mismas para una calibración en velocidad (m/s), que una en presión ( $\mu$ bar). La razón es que la presión es proporcional a la deformación, que está relacionada con el desplazamiento de la superficie, mientras que la velocidad es la derivada temporal del desplazamiento de la superficie. Para una frecuencia constante, las relaciones son:

$$D = \text{sen} (\omega t) \quad V_s = dD/dt = \omega \cos (\omega t) \quad ( 1.5 )$$

donde D es el desplazamiento de la superficie y  $V_s$  es la velocidad de la superficie. Así, la curva de calibración en velocidad es aproximadamente la curva de calibración en presión multiplicada por la frecuencia.

Debido a la existencia de diferente tipo de sensores de EA, y a que son usados para detectar distintas clase de ondas en materiales variados, no es posible tener un procedimiento de calibración universal. La calibración de un sensor, debería proveer un registro del desplazamiento de un punto de la superficie del objeto examinado por el sensor. Existen varios problemas fundamentales para calibrar un sensor: a) la propagación de las ondas depende del material; b) el desplazamiento de un punto de la superficie del material, es un vector tridimensional, pero la salida del sensor es un escalar, la tensión eléctrica; c) el desplazamiento de la superficie del material es alterado por la presencia del sensor; d) la superficie del sensor cubre una determinada área de la superficie del material, y el desplazamiento es función no sólo del tiempo sino también de la posición dentro de esa área. Debido a estos problemas, en general no es posible comparar distintas calibraciones entre sí.

Las curvas de calibración entonces, pueden ser comparadas si provienen del mismo tipo de fuentes, si tienen las mismas unidades y si las ondas se propagaron en el mismo material. De todos modos, una calibración con ondas de superficie, no debería ser comparada con una calibración de ondas longitudinales<sup>[1-20]</sup>.

Es aconsejable siempre usar alguna forma de calibración del transductor, aunque como ya se dijo, en la práctica no siempre es fácil de lograr, además es muy dificultoso simular el avance real de una fisura

Al seleccionar un sensor para un ensayo determinado, se debería tener alguna idea del rango de frecuencias y del tipo de ondas que se espera recibir, de modo de optimizar las condiciones de trabajo.

## 1.4 - Principios de instrumentación y análisis de datos

Los eventos de EA aparecen como señales azarosas por encima de un fondo de ruido (figura 1.5). Parte del éxito de la técnica reside en minimizar el nivel de ruido, ya sea éste electrónico o acústico. Así, se deben usar materiales piezoeléctricos con alta sensibilidad intrínseca y amplificadores de bajo ruido. Debe además lograrse la mejor aislación del ruido acústico y de las interferencias electromagnéticas. La etapa más crítica de la amplificación es la del preamplificador al que el transductor está acoplado. El preamplificador debe ser del menor nivel de ruido posible y estar cerca del sensor (o incluso dentro de él), a no más de 50 cm, para minimizar la interferencia electromagnética<sup>[1-1]</sup>.

El preamplificador, típicamente provee una ganancia de 100X (40 dB) e incluye filtros pasa altos o pasa banda para eliminar el ruido de fondo mecánico y acústico. La banda de paso más común es de 100 a 300 KHz, comprendiendo los 150 KHz de frecuencia de resonancia de la mayoría de los sensores ampliamente usados. Se puede usar otras frecuencias pero hay limitaciones. A bajas frecuencias, hay problemas con los ruidos mecánicos. A altas frecuencias la onda se atenúa (amortigua) más rápidamente y el rango de detección del sensor será menor. La elección del rango de trabajo es un compromiso entre el ruido y el rango de detección.

Los preamplificadores inevitablemente generan ruido electrónico, y es este ruido el que establece el límite último al más pequeño movimiento detectable con los equipos de EA. La menor señal que puede ser detectada es del orden de 10  $\mu\text{V}$  a la salida del transductor, correspondiendo a un desplazamiento de la superficie del orden de 25 pm, para un típico sensor de alta fidelidad. Esta sensibilidad es más que suficiente para la mayoría de los estudios de END<sup>[1-2]</sup>.

En la práctica casi siempre es necesario usar un filtro de banda de frecuencias, ya que generalmente al reducirse el ancho de banda se mejora la relación señal-ruido. La eliminación de las altas frecuencias reduce el ruido electrónico, mientras que al eliminar las bajas frecuencias se asegura evitar las vibraciones acústicas que en una fábrica pueden ser de gran amplitud.

Durante un ensayo de EA, el sensor sobre la estructura recibe un gran número de señales transitorias. Una señal de un único suceso discreto se conoce como un "evento" ("burst"). Esta señal crece rápidamente y decae más lentamente. En la figura 1.14 puede verse el ejemplo de un evento de EA. Las señales tipo evento varían en forma y velocidad de ocurrencia, dependiendo de la estructura y las condiciones del ensayo. Como ya se dijo, si hay una velocidad de ocurrencia grande, las señales individuales se combinan para dar una emisión continua.

Debido a la complejidad de las señales de EA, generalmente para las emisiones discretas, se miden tres parámetros de la señal: *Amplitud (A)*, *Duración (D)* y *Tiempo de Subida ("Risetime") (R)* (figura 1.14). Previamente, se define un nivel de voltaje como referencia, el *umbral*, por encima del nivel de ruido. La Amplitud se define como la máxima excursión positiva de la señal. La Duración es el lapso que transcurre desde el primer cruce del umbral hasta el último. El Tiempo de Subida es el lapso entre el primer cruce del umbral y la máxima excursión de la señal.

Después de la etapa del sensor y la preamplificación, la señal se transmite al instrumento principal, donde es nuevamente amplificada y filtrada. Luego, está la etapa crítica de la detección de la señal. Esto se logra con un circuito comparador, que genera un pulso de salida digital cada vez que la señal de EA excede el voltaje umbral. El umbral es elegido previamente por el operador, es una variable clave que determina la sensibilidad. Dependiendo del diseño del instrumento, la sensibilidad también puede ser controlada ajustando la ganancia del amplificador.

Uno de los primeros métodos de reducción y análisis de datos, y probablemente todavía el más común, es analizar el número de cuentas (ver figura 1.15), es decir los pulsos que cuentan los *cruces del umbral* ("ringdown"). Este número de cuentas depende de la magnitud de la fuente de EA, pero también depende fuertemente de las propiedades acústicas y la naturaleza reverberante del espécimen y del sensor. Estas cuentas de EA, luego son graficadas en función de la carga aplicada o del tiempo, o como actividad acumulada, o bien como histograma de velocidad de cuentas. Es muy común el uso de un tiempo característico llamado "*tiempo muerto*", que se define como el tiempo en el que el equipo de medición está "sordo", es decir, no realiza ninguna medición. Si se establece un tiempo muerto largo entre sucesivos cruces del umbral, entonces el equipo cuenta el número de *eventos* de EA, mientras que si el tiempo muerto es corto, dará el número variable de cuentas por evento ("ringdown"). En la mayor parte de los trabajos de la década del 70 se empleaba esta técnica, mostrando los datos en un graficador. Este sistema de análisis funciona confiablemente para señales discretas (eventos), aunque el cambio en el nivel umbral, debido a los cambios de ruido, producirá variaciones en los resultados, y esto también se extenderá a las distribuciones de amplitudes. Para señales de tipo continuo este sistema de medición no sirve<sup>[1-1]</sup>.

Una alternativa bastante simple, es pasar la señal amplificada por un dispositivo que mide el *nivel RMS* ("Root Mean Square"), o valor cuadrático medio de la señal. Este último sistema es ideal para la EA continua, particularmente para procesos de fabricación, pero también es útil en la EA discreta (eventos). Mientras que aporta una buena indicación de la velocidad de actividad de la fuente, no da como salida el número de eventos de EA, y para ser usado en la localización de eventos, necesita ser empleado en conjunción con un sistema de umbral<sup>[1-1]</sup>.

Otra magnitud que se puede medir, es conocida como "MARSE", se refiere a las cuentas de energía, es el área medida bajo la envolvente de la señal rectificadas (ver figura 1.16). Aunque el circuito requerido para medirla es relativamente complejo, ha tenido gran aceptación, y se la prefiere respecto de las cuentas, porque es sensible a la amplitud y a la duración al mismo tiempo, y además es menos dependiente del umbral elegido y de la frecuencia de operación<sup>[1-2]</sup>.

Típicamente, la instrumentación de EA debe satisfacer varios requerimientos:

- Debe proveer alguna medida de la cantidad total de la EA detectada, para correlacionarla con el tiempo y/o la carga aplicada.
- Los sistemas usualmente necesitan proveer alguna información estadística de las señales detectadas, para un diagnóstico más detallado de los mecanismos de las fuentes o para mejorar el significado de las señales detectadas.
- Muchos sistemas pueden localizar las fuentes de señales tipo evento, comparando los tiempos de arribo de la onda a los diferentes sensores. Es ésta una importante capacidad de gran valor, para ensayar estructuras grandes o pequeñas.

- Los sistemas deberían proveer de un medio de discriminar entre las señales de interés y las señales de ruido de fondo, provenientes de la fricción, impacto e interferencia electromagnética.

La instrumentación varía ampliamente en forma, funciones y costo. Algunos equipos son diseñados para trabajar automáticamente en ambientes de producción automatizados. Otros, son diseñados para realizar una adquisición de datos completa y un extenso análisis en las manos de un investigador. Otros son diseñados para ser usados por técnicos e inspectores de END, realizando ensayos con normas internacionales preestablecidas<sup>[1-2]</sup>.

En los sistemas de EA multicanales, las mediciones de las señales se producen sobre cada canal que detecta la onda de EA. Hay sistemas disponibles de variada capacidad, desde 1 canal a 100 canales, dependiendo del tamaño y la complejidad de la estructura a ser ensayada. Los sistemas de laboratorio típicos usan de 2 a 6 canales, mientras que la mayoría de los ensayos industriales se realizan con muchos más canales, del orden de varias decenas, ya que las dimensiones de las estructuras a estudiar son muy grandes, por ejemplo tanques de 20 m de diámetro.

Una señal individual de EA puede ser detectada por uno o más canales, dependiendo de su intensidad, la atenuación de las ondas en la estructura, y el espaciamiento de los sensores. Por lo tanto, una de las primeras tareas de un sistema multicanal, es determinar si un grupo de ondas que arriban muy juntas a diferentes sensores, corresponden al mismo evento original, pudiendo entonces los correspondientes tiempos de arribo ser utilizados para la localización espacial. Dependiendo del diseño del sistema, esto puede lograrse por "software" o por "hardware". El segundo, tercer y cuarto arribo, pueden retenerse para ser usados en una localización espacial, o pueden ser desechados, si no son necesarios. Después de esta tarea de identificación del "golpe" (arribo del pulso mecánico al sensor), el sistema puede dedicarse a la descripción de los eventos, tal como identificar los canales involucrados, información de los distintos tiempos de arribo, y parámetros de la señal, medidos en el primer canal "golpeado".

Las descripciones anteriores, luego son pasadas a través de un procesador central que coordina las tareas de almacenamiento de datos, presentación de datos, y comunicación con el operador. El almacenamiento completo de los datos es de vital importancia para la tecnología de EA aplicada. El operador no está limitado a lo que él puede observar durante el ensayo, porque los resultados pueden refinarse, filtrarse, y presentarse de una manera distinta, en el análisis posterior al ensayo. La presentación de datos puede ser variada, pudiendo ser clasificada como:

- Gráficos temporales que muestran el curso del ensayo desde el comienzo al final.
- Funciones de distribución que muestran propiedades estadísticas de la emisión.
- Gráficos que muestran la distribución de la emisión detectada, por canal.
- Gráficos que muestran la localización espacial de las fuentes de EA.
- Gráficos puntuales que muestran la correlación entre diferentes parámetros de la EA.

- Gráficos de diagnóstico que muestran la severidad de las indicaciones de la EA en las distintas partes de la estructura.
- Gráficos que muestran la distribución de energía.
- Gráficos que muestran la evolución del valor RMS.
- Análisis del espectro de frecuencias de la señal.

Algunas de estas presentaciones pueden verse en la figura 1.17.

Al final de la década del 70 los equipos de EA alcanzaron un gran desarrollo, pero luego fueron superados por el de los sistemas computarizados. El gran desarrollo de la tecnología de EA coincide con el desarrollo de las computadoras, y éstas, probablemente fueron empleadas primero en la EA, antes que en otras técnicas de END. Las computadoras primero fueron usadas en los sistemas multicanales de localización de fuentes, luego fueron usadas para propósitos más generales, como almacenamiento, análisis y presentación de datos. Al mismo tiempo se empezaron a analizar otros aspectos de las señales, además del cruce del umbral<sup>[1-1]</sup>.

Estas tendencias condujeron a un nuevo principio en la instrumentación de EA, que ha dominado desde entonces. Este principio involucra la medición de los parámetros claves de cada señal de EA. El "hardware" genera una descripción digital de cada evento, luego secuencialmente pasa junto con otros descriptores de la señal a un sistema computarizado, que provee el almacenamiento de datos, la presentación gráfica de los mismos y la posibilidad de análisis posteriores, después de finalizado el ensayo. En la figura 1.18 se ve un diagrama en bloque genérico. Los sistemas más grandes, multicanales, dividen la tarea de procesamiento de datos en varios microprocesadores. La mayor prioridad para el microprocesador es leer los datos de cada señal tan rápido como sea completado el proceso de medición, de modo que este circuito quede habilitado para la próxima medición. Los microprocesadores pueden almacenar rápidamente varios cientos de descripciones de señales en sus memorias ("buffers"), pendientes para posteriores procesamientos. Con esta arquitectura de procesamiento paralelo, al agregar nuevos canales se consigue aumentar la potencia de procesamiento<sup>[1-2]</sup>.

La Amplitud es un parámetro muy importante, porque directamente determina la detectabilidad del evento de EA. La Amplitud está directamente relacionada con la magnitud del evento original, puede variar en un rango muy amplio, desde microvoltios a voltios. De todos los parámetros medidos convencionalmente, la amplitud es el más apropiado para obtener información estadística en la forma de funciones de distribución<sup>[1-21]</sup>. Comúnmente las amplitudes de EA son expresadas en escala logarítmica, en dB, definiéndose  $1\mu\text{V}$  en el transductor, como 0 dB,  $10\mu\text{V}$  como 20 dB,  $100\mu\text{V}$  como 40 dB, etc..

La Duración, que se mide en  $\mu\text{s}$ , depende de la magnitud de la fuente, la estructura acústica y la reverberación. Es muy valiosa para reconocer ciertos procesos de fuentes de larga duración, tales como la delaminación en materiales compuestos<sup>[1-22]</sup>, y puede ser útil para el filtrado del ruido y otros tipos de calificación de la señal.

El Tiempo de Subida ("Risetime"), está gobernado por el proceso de propagación de las ondas entre la fuente y el sensor, también se puede usar para varios tipos de calificación de las señales y para la eliminación del ruido.



Es obvio que a diferencia de la Amplitud, no se puede medir la Duración y el Tiempo de Subida, en forma absoluta, ya que ambos dependen del umbral elegido, relacionado con el ruido, y el método de detección de la señal.

El espectro de frecuencia de una señal de EA estará determinado por la banda de paso de la etapa amplificadora, la respuesta en frecuencia del sensor, la geometría del cuerpo, y las características de las fuentes de EA. Lo normal en la EA es que no hay dos señales que tengan exactamente el mismo contenido de frecuencias. La variación puede ser pequeña para una fuente localizada, en una geometría bien definida y para un material homogéneo. En materiales heterogéneos, como los compuestos, en fuentes muy dispersas en materiales de compleja geometría, se producirán grandes variaciones.

Generalmente, el espectro de un pulso de EA tendrá muchos picos a diferentes frecuencias. Una fuente impulsiva de corta duración generará una emisión con un amplio contenido de frecuencias. El espectro de una función  $\delta(t)$  (un gran impulso con duración nula), contendrá todo el espectro de frecuencias. Cuando este pulso se va modificando por la transmisión a través del medio, y por los dispositivos de amplificación y medición, algunas de estas frecuencias son filtradas. El espectro de frecuencias de una señal, puede mirarse como el registro complejo de todo lo que le ha sucedido a la señal desde su generación hasta su representación en un osciloscopio, pero no está claro que este registro pueda ser leído más allá de los detalles crudos.<sup>[1-17]</sup>

Otra magnitud que puede ser medida es la energía de una señal de EA, definida como:

$$E = \frac{1}{R} \int_0^{\infty} V(t)^2 dt \quad (.1.6.)$$

donde  $R$  es la carga resistiva del sensor y  $V(t)$  es la dependencia temporal del voltaje de salida del sensor. En esta definición se supone que no hay voltaje de ruido, de otro modo, la integral sería infinita. Prácticamente, los límites de integración, están determinados por la duración de la señal.

Las energías de las señales de EA pueden ser extremadamente pequeñas. Una señal fácilmente detectable podría tener una amplitud de  $10 \mu\text{V}$  y una duración de  $10 \mu\text{s}$ . Asumiendo por simplicidad un pulso cuadrado no oscilatorio, y una resistencia de entrada al amplificador de  $20 \text{ K}\Omega$ , la energía de la señal será de  $5 \times 10^{-13}$  ergios. Debe tenerse en cuenta que ésta es la energía de la señal, no la energía de la EA. La eficiencia en el acoplamiento del sensor, la atenuación del material, y todos los problemas de la partición de la energía entre los distintos modos acústicos, hacen difícil estimar exactamente la energía en un pulso de EA, aún en condiciones de laboratorio altamente controladas.

Además de detectar y localizar los eventos de EA, se pretende caracterizarlos, identificando cuál es la fuente, y siempre que sea posible, cuantificar la acumulación del daño. Básicamente hay dos aproximaciones, el método estadístico o empírico<sup>[1-23]</sup>, y el método fundamental o determinístico<sup>[1-24]</sup>.

Los *métodos estadísticos* involucran primero extraer un gran número de parámetros de cada señal, por ejemplo: tiempos de arribo, amplitudes, componentes principales de frecuencia. El próximo paso es usar un conjunto de datos como conjunto

de aprendizaje, para deducir "patrones" en los parámetros medidos, que puedan ser correlacionados con otras evidencias de las fuentes productoras de eventos, analizadas por ejemplo por exámenes destructivos u otras técnicas de END. Esta "técnica de reconocimiento de patrones" luego se aplica a los datos de eventos desconocidos, siendo éstos categorizados de acuerdo al "racimo" ("cluster") de valores en el cual caen los parámetros.

Claramente, la caracterización estadística tiene gran aplicación, por ejemplo se usa en procesos de soldadura, en ensayos de recipientes de presión para uso en el área nuclear, o en ensayos de componentes de aviones. Es particularmente apropiado para geometrías complejas, materiales anisotrópicos o inhomogéneos, debido a que no asume ningún conocimiento de las relaciones físicas entre las fuentes del proceso y las mediciones realizadas. Es fácil de aplicar con el uso de las cada vez más potentes computadoras, pero sí requiere de gran cantidad de conjuntos de datos. Debe notarse que el método estadístico no tiene garantía de éxito. Sólo puede extraer correlaciones significativas si hay información relevante escondida en los datos. También puede ser propenso a producir correlaciones que no son relevantes al problema, por lo tanto es aconsejable realizar muchos ensayos<sup>[1-1]</sup>.

La *caracterización determinística* está basada en el conocimiento detallado de los procesos físicos involucrados en las fuentes, la propagación de ondas y la detección de los transductores, para poder establecer un modelo matemático. Los modelos, no sólo necesitan extensivos conocimientos teóricos, sino cuidadosos procedimientos de calibración. La ventaja es que es capaz de producir información cuantitativa acerca de la fuente de cada evento en una forma muy útil. Una caracterización determinística completa está, de todos modos, casi siempre limitada a pocas aplicaciones en las que pueda ser usada, y a requerir costosas facilidades computacionales. Una versión simplificada, empleando sólo el arribo de ciertas ondas es más fácil de aplicar, en el caso en que los transductores puedan ser colocados relativamente cerca de la región donde estén las fuentes de EA, pero puede inducir a errores. A largo plazo, la respuesta puede ser una técnica de compromiso, en la cual a partir de los datos experimentales, se midan los parámetros físicamente significativos y luego éstos sean analizados estadísticamente. Un factor clave será siempre la calidad de los datos, siendo necesario el continuo desarrollo de los sensores<sup>[1-1]</sup>.

En la literatura, las señales de EA a menudo son modeladas por una onda sinusoidal que decae, de la forma:

$$Y(t) = A_0 \exp(-\alpha t) \sin(\omega t) \quad (.1.7.)$$

donde  $\omega = 2 \pi \nu$ ,  $A_0$  es la amplitud y  $\alpha$  es el factor de amortiguación, en la figura 1.19, se muestra esta representación. Como puede verse este modelo es una aproximación bastante cruda de una señal real de EA, ya que no se considera el tiempo de subida y las frecuencias complejas. De todos modos puede ser útil para mostrar aproximadamente la dependencia de varios parámetros del análisis de la señal con las características de la misma. Por ejemplo, la energía de esa señal es:

$$E = A_0^2 / [4 \alpha (1 + \alpha^2 / \omega^2)] \quad (1.8)$$

Así la energía de la señal dependerá directamente del factor de amortiguación y de la amplitud, pero es esencialmente independiente de la frecuencia si  $\alpha \ll \omega$ , que es el caso para la mayoría de las señales de EA.

En un trabajo previo del Grupo Ondas Elástica<sup>[1-25]</sup>, teniendo en cuenta los datos obtenidos en los ensayos realizados durante el transcurso de esta Tesis, se generaliza un modelo matemático anterior, generando eventos que cumplen con las estadísticas experimentales. Allí se plantea, como forma para cada evento de EA la siguiente expresión:

$$Y(t) = K t^b \exp(-c t) \operatorname{sen}(\omega t) \quad (1.9)$$

donde  $K$  es una constante,  $b$  un número positivo, y  $c$  un parámetro. Si se considera la envolvente de  $Y(t)$ , puede verse que ésta tiene un máximo en  $t = b/c$ . En el trabajo citado, analizando el caso  $b=1$ ,  $c$  resulta ser el inverso del Risetime. Con este modelo matemático, más realista, se tiene en cuenta no sólo la Amplitud sino también el Risetime. Con estas modificaciones se generaron eventos que cumplían con las estadísticas experimentales obtenidas en los ensayos.

## 1.5 - El ruido

Una parte importante de la tecnología de EA es la precaución que debe tenerse contra la interferencia producida por el ruido. Se han hecho enormes progresos desde las primeras épocas donde los estudiantes trabajaban de noche, usando máquinas de tracción construidas en subsuelos, para evitar las interrupciones en los ensayos debido al tránsito en las calles o al movimiento de personas en los alrededores. Desde hace años, con el avance de la tecnología, se pueden hacer muchos ensayos sin medidas especiales, de modo de poder usar la EA en ambientes extremadamente ruidosos, como fábricas e industrias<sup>[1-2]</sup>.

El punto de partida básico es la selección del rango de frecuencia para el monitoreo de la EA. El fondo de ruido acústico es más alto para bajas frecuencias. El rango de 100KHz a 300 KHz, ha probado ser apropiado para la mayoría de los ensayos de EA. Para ambientes ruidosos, como por ejemplo una usina eléctrica, ha sido necesario usar mayores frecuencias, tales como 500 KHz. Debido a que las altas frecuencias reducen el rango de detección, hay un compromiso inherente entre el rango de detección y la eliminación del ruido<sup>[1-2]</sup>.

Las fuentes de ruido acústico incluyen el flujo de fluidos en bombas y válvulas, procesos de fricción, como el movimiento de una estructura en sus soportes, y procesos de impacto como la lluvia y cables golpeando por el viento la estructura. Las fuentes de ruido eléctrico y electromagnético incluyen conexiones a tierra, circuitos interruptores de potencia, transmisores de radio y navegación y tormentas eléctricas.

Los problemas de ruido pueden manejarse de varias maneras. Primero, en algunos casos puede ser posible detener la fuente productora del ruido. Segundo,

pueden aplicarse barreras de acople de impedancias, o para el ruido mecánico, usar materiales que lo amortigüen en puntos estratégicos de la estructura. Los problemas de ruido eléctrico, que a menudo son causados por deficientes conexiones a tierra, pueden ser eliminados mejorando las conexiones o usando sensores diferenciales, o sensores con el preamplificador incorporado. Si estas medidas no son adecuadas, el problema puede ser atacado por medio del "hardware" o el "software" de los mismos instrumento de EA<sup>[1-2]</sup>.

Los ajustes de sensibilidad, incluyendo las técnicas de "umbral flotante", es decir variando electrónicamente el umbral de acuerdo al ruido promedio, pueden ser muy útiles mientras que no provoquen pérdida de datos de EA esenciales. También se han desarrollado métodos para la aceptación y registro de datos selectivos, basados en el tiempo, la carga, o el origen espacial de los mismos. También, debido a que las señales de ruido presentan diferentes particularidades en la forma de onda, respecto de la verdadera emisión, pueden ser separadas por análisis computacional de las características de las señales. Esto puede lograrse inmediatamente después de la medición (por filtrado en la amplificación), durante el proceso de muestreo de datos (filtrado gráfico), o después del ensayo, con un paquete de filtrado o de análisis avanzado de la forma de onda. Debido al desarrollo y la aplicación de estas técnicas, la inspección por EA ha entrado en servicio en un número creciente de ambientes ruidosos. Los ejemplos, en los que la eliminación del ruido ha sido la clave para el éxito de la aplicación de la EA, incluyen el monitoreo de soldaduras, y la detección de crecimiento por fatiga de fisuras, en aviones en vuelo<sup>[1-26]</sup>.

La mayoría de los equipos de EA que poseen varios canales, tienen la posibilidad de definir algunos de ellos como "*guardas*", estos canales así definidos, tienen la propiedad de rechazar las señales, en el caso en que dichos sensores sean los primeros golpeados. Así se pueden desechar las señales que provengan de zonas ruidosas, imposibles de evitar de otro modo. Generalmente deben colocarse fuera de la zona de estudio, en lugares que serían de fácil acceso a eventos espurios.

## **1.6 - Efecto Kaiser**

Debido a que la EA es producida por la deformación inducida por tensiones, es altamente dependiente de la historia de tensión de la estructura. Las relaciones AE-tensión-tiempo, también dependen del material y el tipo de deformación. Algunos materiales responden casi instantáneamente a la tensión aplicada, emitiendo, y luego quedan en equilibrio estacionario rápidamente. Otros materiales se toman un tiempo para estabilizarse después que se aplicó la carga, esto se observa en materiales que presentan propiedades viscoelásticas, tales como los materiales compuestos con matriz de epoxi. En otros materiales, una carga constante puede producir daño continuo y la estructura puede no estabilizarse nunca. Un ejemplo de esto es la fisuración inducida por hidrógeno, que puede continuar hasta rotura, aún con carga constante, con emisión continua.

Los ensayos de EA en metales, a menudo se llevan a cabo en condiciones de carga creciente. La primera aplicación de la carga producirá típicamente mucho más emisión que las cargas subsiguientes.

Kaiser<sup>[1-27]</sup> en 1950, fue el primero en demostrar que un material, una vez que hubiera sido deformado y luego descargado, no produciría EA en la próxima carga, hasta no exceder la máxima carga alcanzada en el ciclo anterior. Este comportamiento fue llamado *efecto Kaiser*. Este efecto ha tenido gran influencia en el desarrollo de la metodología de los ensayos de EA. Dunegan<sup>[1-28]</sup> mostró que para materiales que obedecen el *efecto Kaiser*, la emisión en cargas repetidas, indicaría que ha ocurrido daño estructural entre una carga y la otra. Ésta fue la base conceptual de muchos de los ensayos de EA en la década del 70, cuando se hicieron los primeros ensayos en campo, de inspección periódica de recipientes de presión y otras estructuras.

Las estrategias de ensayos más recientes, prestan mucha atención a la emisión que ocurre a cargas por debajo del máximo previo alcanzado, y a la emisión cuando la carga se mantiene en un nivel constante. La evidencia es que defectos estructurales significativos, tenderán a exhibir este comportamiento, emisión a cargas inferiores al máximo soportado o con carga constante, mientras que la emisión relacionada con la estabilización de la estructura, tales como el relajamiento de tensiones residuales, no tenderá a producirse cuando la estructura es cargada otra vez<sup>[1-2]</sup>.

Si una fisura se extiende, por ejemplo por fatiga, entre sucesivos intervalos de carga, las tensiones en la punta de la fisura serán mayores que antes, debido a que se habrá incrementado el factor intensificador de tensiones, por lo tanto, podrá producirse EA adicional. Este aspecto forma la base de los programas de inspección periódica por EA.

El efecto Kaiser no se produce en varias circunstancias:

- i ) Cuando un material está más allá de su límite elástico, y se activan procesos dependientes del tiempo, tales como la fluencia.
- ii ) En el caso de transformaciones de fase, donde un material puede pasar por diferentes cambios de fase, generando EA en cada uno de ellos.
- iii ) Cuando hay disponibles mecanismos de reparación de daño, tales como recocido, en plantas que trabajan a elevada temperatura.
- iv ) En materiales compuestos: el efecto Kaiser realmente fue establecido para metales, y no es sorprendente que los materiales compuestos, con su diferentes microestructura y mecanismos de deformación, no se comporten en la misma forma que los materiales isótropos. En estos materiales, no se cumple el efecto Kaiser, a este fenómeno se lo llama *efecto Felicity*, definiéndose el *cociente Felicity (F)* como:

$$F = \text{Tensión a la cual se reinicia la EA} / \text{Máxima tensión previa aplicada}$$

De modo que técnicamente puede decirse que el efecto Kaiser se produce cuando  $F$  es mayor o igual que 1.

De todos modos, si se examina con suficiente detalle las condiciones para el cumplimiento del efecto Kaiser, éstas a menudo no se satisfacen completamente, ni aún en forma aproximada.

Para llevar a cabo un ensayo de EA exitoso, se debe prestar atención antes del ensayo, al planeamiento de la carga de la estructura. Los procedimientos para un ensayo de EA típico especifican las cargas que deben ser aplicadas (relativas a la carga de trabajo o de diseño), y los límites inferior y superior de la velocidad de carga. Uno de los procedimientos más usados es aumentar la carga en forma escalonada, es decir, acrecentándola lentamente, y luego manteniéndola constante por un cierto tiempo; de este modo se logra detectar las zonas potencialmente peligrosas, donde a pesar de que la carga es constante, hay fuentes activas de EA.

Todas estas consideraciones, muestran que en el trabajo con la EA se debe ser cuidadoso con los aspectos de la ciencia de materiales involucrados<sup>[1-29]</sup>.

## **1.7 - EA en metales**

En los metales, los mecanismos responsables de la actividad de EA son muchos. La EA es mayormente detectada durante la deformación causada por la aplicación de una tensión. En esta sección se describe la EA producida por deslizamiento (movimiento de dislocaciones), maclas, y la decohesión o fractura de inclusiones y precipitados, mecanismos todos presentes en distinto grado en los metales. Se seguirá aquí la descripción de Heiple y Carpenter<sup>[1-30]</sup>.

### **1.7.1 - EA por movimiento de dislocaciones**

Existen varios mecanismos por los cuales las dislocaciones pueden crear ondas elásticas, la relajación de un campo de tensiones elásticas en la red cristalina, causada por el pasaje de una dislocación, radiación de la aceleración de una dislocación, y aniquilación de dislocaciones. De todos ellos, la relajación del campo de tensiones parece ser el efecto más importante.

Una aproximación al cálculo del valor esperado del desplazamiento producido por el movimiento de una dislocación, dentro de un material, es tratar el campo de tensiones de un lazo de dislocaciones como la suma de fuerzas dipolares inmersas en el material.

Usando la función de Green, Scruby<sup>[1-31]</sup> calculó la amplitud pico del desplazamiento de la superficie, por el arribo de la primer onda (longitudinal) en el epicentro, causada por el crecimiento de un lazo de dislocaciones en un material isótropo. El lazo se supuso ubicado a una profundidad  $l$  debajo de la superficie, a  $45^\circ$  de la normal a la superficie, y creciendo a velocidad constante  $v$ , desde radio cero al radio final  $r$ . La amplitud pico del desplazamiento se calculó como:

$$U = b r v C_T^2 / D C_L^3 \quad (1.10)$$

donde  $b$  es el vector de Burger,  $C_L$  es la velocidad de las ondas longitudinales y  $C_T$  es la velocidad de las ondas transversales. Para  $n$  lazos que se expanden cooperativamente hasta el mismo radio final, la amplitud pico del desplazamiento está dado por:

$$U_n = n b r v C_T^2 / D C_L^3 \quad (1.11)$$

El desplazamiento calculado varía como  $\text{sen}(2\theta)$ , cuando  $\theta$  es el ángulo entre el plano del lazo de dislocación y la normal a la superficie, y por lo tanto tiene un máximo para  $45^\circ$ . Así los desplazamientos ( 1.10 ) y ( 1.11 ) son los máximos posibles para una fuente dada.

Debe destacarse que, debido a la mayor facilidad de conseguir muestras monocristalinas en aluminio, la mayor parte de los estudios relacionando las distintas teorías propuestas con ensayos experimentales, se llevaron a cabo en este material.

En estas expresiones se deberían notar varios aspectos. Primero, el valor del desplazamiento de la superficie es directamente proporcional a cuánto se mueve el lazo de dislocaciones (su radio  $r$  final) y a su velocidad de desplazamiento. La amplitud también depende del material a través de las velocidades de las ondas longitudinales y transversales. Como ejemplo, usando valores típicos para aluminio ( $C_L = 6400$  m/s,  $C_T = 3200$  m/s,  $b = 2.9 \times 10^{-10}$  m), si la velocidad de la dislocación es de 200 m/s, y la fuente está a 4 cm del epicentro, el pico de amplitud de desplazamiento, calculado para un lazo de dislocaciones expandiéndose hasta el radio de un monocristal (4 mm de diámetro) es de  $1 \times 10^{-13}$  m. Este desplazamiento puede probablemente ser detectado por un transductor piezoeléctrico. Si la misma fuente estuviera en un policristal de 40  $\mu\text{m}$  de tamaño de grano, entonces el máximo radio del lazo sería de 20  $\mu\text{m}$ , y el desplazamiento calculado sería de  $1 \times 10^{-15}$  m, que probablemente no sería detectado.

La matemática involucrada en los cálculos del movimiento de dislocaciones y otras fuentes de EA, es formidable, pero esta complejidad no debería oscurecer el hecho de que están involucradas importantes aproximaciones, ni que el detalle de los mecanismos, por los cuales el movimiento de dislocaciones produce ondas elásticas, no son perfectamente conocidos. Por ejemplo, la ecuación ( 1.10 ) asume que la fuente es puntual y que todas sus componentes actúan en fase. El cálculo del desplazamiento de la superficie a partir de la propagación de una fisura dentro del material, es similar al del movimiento de las dislocaciones, con la aproximación de fuente puntual. El efecto de considerar el movimiento de la fuente, es aumentar en el tiempo el desplazamiento de la superficie y reducir su amplitud. También se ha propuesto que las ondas elásticas detectadas como EA a partir del movimiento de dislocaciones, no se originan por la relajación de tensiones elásticas causadas por el deslizamiento de las dislocaciones, como se asumió en la deducción de la ecuación ( 1.10 ), sino de la energía irradiada por la aceleración de las dislocaciones. La energía irradiada por una dislocación acelerada es análoga a la radiación de Bremstrahlung de la aceleración de una partícula cargada. Hasta ahora no se ha encontrado evidencia experimental que permita separar la EA proveniente del desplazamiento de dislocaciones, de la proveniente de la aceleración de dislocaciones.

De lo expuesto, se observa que los mecanismos por los cuales el movimiento de dislocaciones produce EA, no han sido determinados claramente. De todos modos, de estos cálculos se pueden hacer varias predicciones importantes, que demuestran un acuerdo cualitativo con gran cantidad de evidencia experimental. Primero, la ecuación ( 1.9 ) predice que en materiales comerciales, donde la distancia de deslizamiento de una dislocación es improbable que exceda los 20 ó 50  $\mu\text{m}$ , no es probable que el movimiento de una sola dislocación produzca ondas elásticas detectables, ya que los detectores más comunes pueden detectar desplazamientos del orden de  $10^{-14}$  m. Esta conclusión está de acuerdo con gran cantidad de evidencia experimental que indica que menos del 1% del movimiento de dislocaciones producido por deformación en metales policristalinos, crea ondas elásticas lo suficientemente grandes como para ser detectadas como EA.

Por lo tanto, con la posible excepción de los monocristales o las muestras puras de grano grande, las ondas elásticas detectables como EA, pueden ser producidas por movimiento de dislocaciones sólo si muchas dislocaciones se mueven casi simultáneamente dentro de un pequeño volumen de material. Más aún, el paquete de dislocaciones se debe mover lo suficientemente rápido y lejos, o su movimiento no será detectado. Ya que estas condiciones a menudo no se satisfacen simultáneamente, sólo una pequeña fracción del movimiento de las dislocaciones asociadas con el flujo plástico, produce EA.

Es bien conocido que las dislocaciones pueden trabarse o anclarse, por varios mecanismos presentes. James y Carpenter<sup>[1-32]</sup> propusieron que al aumentar las tensiones en un conjunto de dislocaciones trabadas, una pequeña cantidad de ellas se destraba de sus anclajes. Esta pequeña onda de tensión producida por el destrabado puede destrabar otras cercanas y causar una avalancha de dislocaciones dentro de un pequeño volumen del material durante un tiempo corto, produciendo sí EA detectable. En sus experimentos con LiF, James y Carpenter estimaron la longitud total de la línea de dislocaciones involucradas en una señal discreta de EA, del orden de 20 m.

Agarwal y otros<sup>[1-33]</sup>, propusieron otro mecanismo fuente distinto. Asumen que cuando una muestra es cargada, eventualmente se alcanza una tensión que activa las fuentes de Frank-Read, o se activan fuentes en el borde de grano. Las nuevas dislocaciones creadas se mueven a lo largo del plano de deslizamiento hasta que se paran por un obstáculo, por ejemplo un borde de grano, un precipitado, u otra dislocación. La fuente, una vez activada, continúa produciendo dislocaciones rápidamente, hasta que la tensión opuesta, generada por el apilamiento de las nuevas dislocaciones contra el obstáculo, se hace lo suficientemente grande como para detener la fuente. Ellos calcularon el desplazamiento axial en la muestra, a partir de este proceso, y supusieron que este desplazamiento axial es lo que detecta el sensor de EA. (Esta suposición es una simplificación sustancial, ya que lo que realmente se detecta son las ondas elásticas liberadas por el movimiento de las dislocaciones). Ellos también calcularon el mínimo desplazamiento detectable por su transductor piezoeléctrico, como del orden de  $7 \times 10^{-15}$  m. Asumiendo un diámetro de la zona de deslizamiento de 10  $\mu\text{m}$  y el movimiento de 13 dislocaciones, el mínimo evento de EA detectable para aluminio 2024, corresponde a la creación y movimiento de una línea de dislocaciones de aproximadamente  $10^{-2}$  cm.

La EA producida por las dislocaciones depende de varios parámetros experimentales y del material, por ejemplo: velocidad de deformación, temperatura del ensayo, pureza, estructura cristalina, irradiación, energía de falla de apilamiento,



tratamiento termomecánico previo, tamaño de grano, tamaño de la muestra y estado de tensiones.

Si el mecanismo de producción de EA no se altera por un cambio en la velocidad de deformación, el único efecto de un cambio en la velocidad de deformación, debería ser producir un cambio correspondiente en la velocidad de producción de los eventos de EA. Así, la velocidad de producción de eventos de EA debería ser proporcional a la velocidad de deformación, como fue observado experimentalmente por varios autores. Además, si los eventos en sí mismos no son afectados por la velocidad de deformación, la potencia en las señales de EA, debería ser proporcional a la velocidad de deformación. Esto también fue observado experimentalmente para monocristales y policristales en distintos niveles de pureza. La energía es proporcional a  $V_{rms}^2 \Delta t$ , siendo  $V_{rms}$  el valor cuadrático medio de la tensión de la señal de EA en un intervalo de tiempo  $\Delta t$ , por lo tanto el  $V_{rms}$  debería ser proporcional a  $|\dot{\epsilon} \dot{t}|^{1/2}$ , donde  $\dot{\epsilon} \dot{t}$  es la velocidad de deformación del ensayo.

Si el material o las condiciones experimentales son tales que las dislocaciones se traban en los átomos de soluto, entonces la adición de más soluto puede aumentar mucho la EA comparada con la del metal puro.

Debido a la extrema sensibilidad en las propiedades de deformación de los metales con estructura cristalina bcc, a las pequeñas concentraciones de impurezas intersticiales, se espera que la EA sea sensible a las impurezas intersticiales en este tipo de sistema cristalino.

Los efectos de la estructura cristalina en la EA producida por dislocaciones, son difíciles de evaluar debido a que intervienen muchos otros parámetros del material. Debe tenerse cuidado al clasificar los efectos de variables tales como tamaño de grano, energía de falla de apilamiento, nivel de impurezas y así determinar los efectos que son causados primariamente por la estructura cristalina. Las dificultades en hacer esto son claras, por lo tanto no hay muchos datos respecto a la influencia de la estructura cristalina. Otra dificultad importante es que el maclado es mucho más común en algunos sistemas cristalinos que en otros.

El comportamiento de la EA en un material puede ser sustancialmente influenciado por su historia previa de trabajado mecánico, si no fue recristalizado después del trabajado. Aún si fue recristalizado, se puede observar un efecto secundario a través de la dependencia de la EA con el tamaño de grano, debido a que el tamaño de grano depende, en parte, de la historia previa de trabajado mecánico.

El trabajado mecánico puede tener un efecto sustancial en que las dislocaciones no sean fuentes de EA, ya que afecta la forma, tamaño, y distribución de las inclusiones y partículas de segunda fase, que se sabe producen EA en varios sistemas.

Es bien sabido que los tratamientos térmicos afectan el tamaño de grano, la densidad y distribución de dislocaciones, la distribución de átomos de soluto, y el tamaño, distribución y tipo de precipitados. Como ya se vio, estos elementos afectan la EA proveniente del movimiento de las dislocaciones. Por supuesto, hay muchos efectos adicionales del tratamiento térmico, incluyendo cambios en el tipo, forma, distribución y geometría de las segundas fases intencionales (tales como la cementita en hierro), cambios en la estructura cristalina, o cambios en la distribución de inclusiones (tales como la concentración y tamaño de los carburos en el borde de grano). Las velocidades de enfriamiento a partir de la temperatura de recocido tienen un efecto

sustancial en la EA, aún en metales que no hayan sido endurecidos por envejecimiento.

Comercialmente, los aceros son las aleaciones con tratamientos térmicos más importantes. Los cambios microestructurales producidos por un tratamiento térmico en aceros, pueden ser muy complejos y junto con las variables microestructurales son responsables de los cambios en la EA a partir del movimiento de dislocaciones.

Resumiendo, el trabajado previo en frío o a temperatura, generalmente reduce la EA posterior. La reducción es probablemente causada por uno o ambos de los siguientes factores: (1) se agotan durante el trabajado fuentes que de otra forma hubieran operado durante el ensayo, o (2) se incrementa la densidad de dislocaciones, reduciendo por lo tanto la distancia de deslizamiento de los paquetes de dislocaciones. La historia térmica previa influencia el tamaño, distribución y morfología de los precipitados, átomos de soluto, inclusiones, y segundas fases intencionales. También afecta el tamaño de grano y la densidad de dislocaciones. Todos estos factores influyen en la EA.

El efecto en la EA, al cambiar el tamaño de grano de la muestra es todavía un área de controversia. Aparentemente, la EA tiene un máximo en un tamaño de grano particular (que puede ser un monocristal), pero el tamaño de grano en el cual ocurre la máxima EA depende de la pureza de la muestra y otros factores.

Si los eventos responsables de la EA ocurren dentro de una distancia (o volumen) pequeño, comparado con las dimensiones de la muestra, y si las fuentes están homogéneamente distribuidas dentro de la muestra, entonces el único efecto de alterar el volumen de la muestra debería ser un cambio proporcional en el número de eventos activados a una deformación particular, permaneciendo las otras variables experimentales inalteradas. Estas condiciones deberían satisfacerse para materiales policristalinos con un tamaño de grano pequeño comparado con la sección transversal de la muestra, ya que los mecanismos postulados para la EA a partir del deslizamiento se espera que se produzcan dentro de uno, o como máximo unos pocos granos. Así, la velocidad de producción de señales de EA o la velocidad de liberación de energía, debería ser proporcional al volumen deformado de la muestra.

Hamstad et al.<sup>[1-34, 1-35]</sup> mostraron que el estado de tensiones altera significativamente la EA de un dado material. En ensayos con acero inoxidable y aluminio, detectaron más EA y que ésta ocurría a deformaciones menores en carga uniforme biaxial que en carga uniaxial. La diferencia fue atribuida a aumentar la fractura de inclusiones en el estado biaxial de tensión-deformación, comparado con el estado uniaxial.

La EA creada por movimiento de dislocaciones no es afectada por el modo de deformación (tensión o compresión), aunque la EA realmente detectada sí puede ser diferente pero causada por las diferencias en la geometría de la muestra. La situación con los deslizamientos de dislocaciones es por lo tanto bastante más diferente que en el caso de maclas o fractura de inclusiones, que como se verá más adelante, está más influenciada por el modo de ensayo.

### 1.7.2 - EA por maclas de deformación

El deslizamiento y el maclado son los dos mecanismos por los cuales los metales se deforman plásticamente. El deslizamiento es la traslación de los planos cristalinos unos sobre otros efectuada por el movimiento de dislocaciones. La deformación por maclado difiere fundamentalmente del deslizamiento. En el deslizamiento, las áreas deslizadas y no deslizadas mantienen la misma orientación cristalográfica, mientras que las regiones macladas y no macladas tienen diferentes orientaciones. El maclado se produce cuando una porción del cristal cambia su orientación original a una nueva, relacionada con la red no maclada, en forma perfectamente simétrica. La región maclada es una perfecta imagen especular del cristal original. El plano de simetría entre estas dos partes se llama plano de maclado. La figura 1.20 muestra una disposición atómica típica de una macla. La figura 1.20 (A) representa una sección perpendicular a la superficie en una red cúbica. El plano de maclado es perpendicular al plano del papel. Si se aplica una tensión de corte, el cristal maclará alrededor del plano de maclado, como se ve en la figura 1.20 (B). La región a la derecha del plano de maclado no está deformada. A la izquierda de este plano, los planos de los átomos se comparten de modo de hacer una imagen especular de la red a través del plano de maclado. En la figura 1.20 (C) los círculos abiertos representan átomos que no se han movido, las líneas punteadas indican el movimiento de los átomos, y los círculos negros son las posiciones finales de los átomos después de la deformación por maclado.

Debe señalarse que hay otras diferencias significativas entre el deslizamiento y el maclado, además de las relaciones cristalográficas. El movimiento de los átomos durante el deslizamiento generalmente ocurre en múltiplos del espaciado atómico, mientras que en el maclado, los movimientos atómicos son a menudo mucho menores que una distancia atómica. Los deslizamientos ocurren en planos separados y a menudo, ampliamente espaciados; de todos modos, en la región maclada de un cristal, cada plano atómico está involucrado en la deformación. Más aún, al menos la parte inicial de la nucleación del maclado y el crecimiento se producen a altas velocidades, en el orden de la velocidad del sonido. La velocidad de las dislocaciones durante el deslizamiento puede ser grande en algunas condiciones, pero puede ser bastante chica en otras circunstancias.

Otra importante distinción entre el deslizamiento y el maclado es que la tensión de corte producida por el maclado es pequeña. La mayor importancia del maclado en la deformación plástica es que los cambios de orientación resultantes a partir del maclado, pueden orientar nuevos sistemas de deslizamiento favorables para el deslizamiento, y por lo tanto permitir deformación adicional.

El proceso de maclado ocurre en tres etapas: nucleación de un embrión de maclado, crecimiento rápido del embrión en una macla macroscópicamente observable, y ensanchamiento de la macla, normal a su dirección original de crecimiento. Típicamente, la velocidad de ensanchamiento es mucho más baja que la velocidad de crecimiento del embrión. A pesar de los numerosos estudios realizados, falta todavía una comprensión fundamental en lo concerniente a los mecanismos atómicos para la nucleación y crecimiento de las maclas de deformación en cristales metálicos.

Independientemente del mecanismo preciso por el cual ocurre el maclado, la rápida deformación de corte debido al crecimiento de una macla de deformación, la hace una excelente fuente de EA. El maclado de deformación del estaño y el zinc (llamados el "grito" del estaño y del zinc) fueron uno de las primeras fuentes de EA reportadas, en 1916. La ecuación (1.10) muestra que el desplazamiento causado por el movimiento de una dislocación es proporcional a la distancia que se mueve la dislocación y a su velocidad de movimiento. La energía liberada por el movimiento de una dislocación es proporcional al área atravesada. Así, la intensidad de la señal de EA producida por una fuente está relacionada con ambas, la cantidad de energía liberada y el tiempo durante el cual ocurre la liberación. Ya que las maclas de deformación liberan suficiente energía y lo hacen dentro de un tiempo muy corto, son excelentes fuentes de EA. Incluso en algunos materiales, como el estaño y el zinc, la deformación por maclado produce EA en el rango audible.

No existen cálculos disponibles del desplazamiento de la superficie producido por la nucleación de una macla y su crecimiento.

Toda la evidencia disponible indica que cuando se forman maclas de deformación, se genera EA detectable. Debido a que la formación de una macla produce eventos de EA, los factores que controlan la velocidad de nucleación, también controlan la velocidad de emisión de la EA. Los factores que se espera que sean importantes en la nucleación de maclas incluyen la velocidad de deformación, grado de deformación, temperatura, estructura cristalina y pureza del material, trabajado mecánico y tratamiento térmico previos.

Una determinación exacta de la EA que surge del maclado es difícil, porque la deformación por maclado está siempre acompañada por algo de deslizamiento. Hasta el presente, es casi imposible separar las contribuciones a la EA medida, proveniente de la deformación por maclado y del deslizamiento.

De acuerdo a la actual comprensión de la formación de maclas, no hay razón para que la EA producida por una dada macla de deformación debiera depender de la estructura cristalina del material. No hay datos de EA relevantes con respecto a este resultado. De todos modos, la estructura cristalina tiene un efecto sustancial en la probabilidad de deformación por maclado, siendo mucho más común el maclado en estructuras menos simétricas. Esto surge porque en las estructuras menos simétricas hay pocos sistemas de deslizamiento, de modo que la tensión de maclado es menor que la tensión para deslizamiento, para un gran rango de orientaciones de tensiones.

Hasta el momento no se conoce el efecto del estado de tensiones, uniaxial o multiaxial, sobre el maclado. De todos modos, la dirección de deformación es crítica en la deformación por maclado, porque la tensión de corte, en contraste con el deslizamiento, es polar, es decir puede ocurrir en una única dirección.

Obviamente, el modo de deformación y la dirección son importantes en el maclado y la EA asociada en monocristales. Los metales policristalinos usualmente tienen algún grado de orientación cristalográfica preferida, de modo que el modo y la dirección del ensayo son importantes en la determinación de la cantidad de maclas de deformación y la EA producida.

### 1.7.3 - EA por fractura y decohesión de inclusiones

Durante muchos años, las partículas de segunda fase y las inclusiones han sido reconocidas como posibles fuente de EA. Bajo ciertas circunstancias, la fractura de inclusiones es la única fuente significativa de EA. Éste es usualmente el caso en ensayos de tensión en la dirección transversal más corta de placas de acero, ya que las inclusiones quedan estiradas en la dirección de la laminación, presentando la mayor superficie de contacto con la matriz en la dirección longitudinal.

La distinción entre inclusiones y partículas de segunda fase es algo arbitraria; las inclusiones surgen de las impurezas en la aleación, las partículas de segunda fase son componentes intencionales de la aleación. La mayoría de las inclusiones son compuestos, tales como sulfuros en aceros, o silicatos en aleaciones de aluminio. Estos compuestos son usualmente duros y frágiles comparados con la matriz. Los sulfuros de manganeso son una excepción a esta regla general, pues son blando y dúctiles.

Los precipitados responsables del endurecimiento en las aleaciones endurecidas por precipitados, son una clase especial de partículas de segunda fase. Estos precipitados son pequeños comparados con las típicas inclusiones de impurezas. Los precipitados normalmente no se fracturan durante la deformación; pero si así lo hicieran, su pequeño tamaño haría que la energía liberada durante su fractura o decohesión fuera demasiado pequeña como para ser detectada como EA.

Debido a que las propiedades elásticas y plásticas de las inclusiones son generalmente bastante diferentes de las de la matriz, se producen grandes concentraciones de tensiones dentro y cerca de las inclusiones durante la deformación plástica. Si las tensiones son suficientemente grandes, puede ocurrir la fractura de la inclusión y/o la propagación de una fisura a lo largo de la interfaz (decohesión inclusión-matriz). Se cree que ambos procesos se producen a relativamente alta velocidad, con propagación de fisura frágil que produce una súbita relajación de tensiones, y por lo tanto se espera que sean buenas fuentes de EA.

Aquí la situación es más compleja que con el maclado. La formación de una macla produce una señal de EA, pero la decohesión de una inclusión puede ocurrir en varios pasos y producir varias señales de EA. Parecería que la fractura de una inclusión produjera una EA, aunque múltiples señales podrían ser producidos por múltiples fisuras en una sola inclusión. El estado de tensiones y el modo de deformación son importantes en la fractura y decohesión de inclusiones. La deformación tensora y las tensiones biaxiales favorecen la fractura y decohesión de las inclusiones; las fuerzas compresivas tienen efecto contrario. La diferencia drástica entre la EA producida durante la tensión y compresión, proveniente de la fractura y decohesión de inclusiones fue usada para separar la EA causada por el movimiento de dislocaciones (que es casi la misma en compresión o tensión), de la EA deducible de la fractura/decohesión de inclusiones, sobre todo en aluminio.

La energía liberada de la fractura de una inclusión con propiedades elásticas diferentes de las de la matriz, no es la misma que para la formación de una fisura en la matriz misma.

Durante la deformación, las tensiones sobre una inclusión difieren de las tensiones sobre la matriz debido a:

1. los diferentes módulos elásticos en la matriz y la inclusión (inhomogeneidad de tensiones),
2. las tensiones de acomodación entre la inclusión (asumiendo que se deforma sólo elásticamente) y la matriz plásticamente deformada (tensiones de plasticidad), y
3. los diferentes coeficientes de expansión térmicos de la matriz y la inclusión (desajuste de tensiones).

Este desajuste de tensiones no surge, por supuesto, del proceso de deformación, sino que generalmente es generado durante el tratamiento térmico de la aleación.

El análisis antes descrito, no se puede aplicar sin modificaciones al proceso de decohesión, porque la propagación de fisuras ocurre en la interfaz entre materiales con diferentes propiedades elásticas. Más aún, la longitud de la fisura asumida no es obvia, ya que la decohesión puede producirse en varios pasos, más que uno, como se esperaría en la fractura frágil de una inclusión. En la literatura existe evidencia de que la decohesión puede producir una contribución sustancial a la EA.

No existen reportes publicados del efecto de la velocidad de deformación sobre la EA producida por las inclusiones. Como se discutió antes, cuando el mecanismo responsable de la producción de EA no se altera por un cambio en la velocidad de deformación, el efecto de cambiar la velocidad de deformación produce un cambio correspondiente en la velocidad de producción de la EA. Bajo estas condiciones, el  $V_{\text{RMS}}$  debería ser proporcional a  $\dot{\epsilon}^{1/2}$ . El mecanismo de fractura y/o decohesión de inclusiones se espera que sea independiente de la velocidad de deformación (al menos para velocidades normales de deformación y temperaturas relativamente bajas), y dependiente sólo de la tensión aplicada requerida para producir una tensión suficientemente grande sobre la inclusión, para iniciar la fractura o la decohesión.

Numerosas investigaciones muestran que la EA producida durante la deformación de acero estructural laminado en caliente es sensible al número, tamaño y distribución de inclusiones, principalmente a las inclusiones de MnS. La EA de estas inclusiones se produce más fuertemente durante la deformación tensora en la menor dirección transversal (espesor). La EA se genera con señales discretas (eventos) en el rango elástico macroscópico. Debido a la dependencia con la dirección del ensayo y la baja tensión a la que ocurre, estos eventos de EA aparentemente son producidos primariamente por la decohesión de las inclusiones de MnS.

Ono<sup>[1-37]</sup> investigó la EA proveniente de las inclusiones de MnS en aceros A533B y encontró señales tipo eventos en muestras ensayadas en tensión en la dirección del espesor. El número y tamaño de los eventos de EA se incrementaron con el contenido de sulfuro de la placa de acero. La distribución de tamaños de las inclusiones fue dependiente del cociente del laminado y la temperatura final, y seguía una distribución de Weibull.

El tipo, tamaño, composición probable y otros aspectos de las inclusiones han sido caracterizados en muchas investigaciones de EA; de todos modos, las propiedades mecánicas de estas inclusiones son casi desconocidas. Esta falta de conocimiento es debida principalmente a la obvia dificultad de obtener muestras

macroscópicas para medición de sus propiedades mecánicas. La concentración de tensiones dentro de las inclusiones se incrementan cuanto más se diferencien las propiedades de expansión térmica y elástica, respecto de la matriz. En algunas inclusiones, tales concentraciones de tensiones, pueden requerir de una tensión suficientemente alta para causar la fractura.

En general, en aceros, la EA atribuida a la decohesión de inclusiones de MnS es de tipo discreto (evento), ocurre en la región macroscópicamente elástica de la curva tensión-deformación, y es más pronunciada para muestras ensayadas en la dirección del espesor de la placa laminada.

Tanto el tamaño como la geometría de las inclusiones son importantes para determinar la EA de la fractura y decohesión de inclusiones. Cuanto más grande la inclusión, se libera más energía por su fractura, y más baja es la tensión requerida para producir la fractura.

Ambos, el estado de tensiones y el modo de deformación son importantes en la generación de la EA de la fractura y decohesión de inclusiones, porque ellos afectan la probabilidad de falla. Para tensiones uniaxiales, las tensiones favorecen la fractura y decohesión de inclusiones, mientras que la compresión no tiende a producir fracturas o decohesión de las inclusiones.

La orientación de la muestra también tiene un efecto significativo en el nivel de actividad de la EA, durante la deformación uniaxial de materiales con inclusiones no esféricas. Este efecto se nota comunmente en placas de acero laminadas donde las inclusiones de MnS son discos achatados con sus caras más grandes paralelas a la superficie de la placa. Las muestras ensayadas a la tensión en la dirección transversal (del espesor), producen más EA que las muestras ensayadas en otras direcciones.

Hamstad<sup>[1-34, 1-35]</sup> encontró que en los ensayos en tensión biaxial uniforme se produce más EA a menores deformaciones que en los ensayos de tensión uniaxial. El incremento en la actividad de la EA se atribuyó al incremento en la probabilidad de fractura o decohesión de inclusiones en los ensayos biaxiales, comparadas con el estado de tensiones uniaxiales.

#### **1.7.4 - EA por fractura dúctil**

En esta sección se sigue los lineamientos del trabajo de Sano y Fujimoto<sup>[1-38]</sup>. En dicho trabajo plantean relacionar la EA generada durante el crecimiento lento de una fisura con tres procesos diferentes: 1) crecimiento de la zona plástica en la punta de la fisura, 2) microfisuras dentro de la zona del proceso, y 3) extensión de la fisura primaria. Las zonas correspondientes a este proceso se muestran esquemáticamente en la figura 1.21.

1) La EA asociada con el crecimiento de la zona plástica puede ser caracterizada con una EA continua y/o un gran número de emisiones tipo evento pero de pequeña amplitud. Es difícil en tales casos discriminar emisiones individuales y pueden aparecer como un continuo, cuya detección dependerá del umbral

seleccionado. De aquí se ve que la dificultad experimental para detectar la EA asociada con el crecimiento en la punta de la fisura es grande.

2) El tamaño de la zona del proceso se asume que es aproximadamente el de la zona plástica. El mecanismo de microfisuras consiste de fisuras por microclivaje del orden del tamaño de un grano simple y la fractura y/o decohesión de inclusiones. La fisuración por microclivaje usualmente se nuclea en la fractura de la perlita y la cementita, la cual precipita en el borde de grano y en la intersección de las bandas de deslizamiento. Las características de la EA asociada con este mecanismo, son por lo tanto, consideradas como emisiones de tipo evento de gran amplitud.

3) La energía asociada con el proceso de extensión de la fisura primaria, ha sido correlacionada con los parámetros de la mecánica de fractura. La energía elástica,  $U$ , de un material con módulo de Young,  $E$ , conteniendo una fisura de longitud  $a$ , bajo una tensión aplicada  $\sigma$ , puede representarse como:

$$U = \pi \sigma^2 a^2 / E \quad \text{constante} \quad (1.12)$$

La energía elástica liberada,  $\Delta U$ , cuando la fisura se incrementa en  $\Delta a$ , se expresa como:

$$\Delta U = 2 \pi \sigma^2 a \Delta a / E \quad (1.12)$$

La deformación plástica siempre juega un importante rol en el proceso de fractura en los metales, y esto contribuye considerablemente a las características observadas de la EA. Así, la fractura y la deformación plástica están tan estrechamente relacionadas, que es difícil separarlas en el caso de la fractura de metales.

La dificultad en la detección parecería estar asociada con los procesos microscópicos de la fractura dúctil. El mecanismo es más complicado que en la fractura frágil, y no hay una metodología unificada como sí se ha establecido con la mecánica de fractura.

El proceso de fractura dúctil cuasiestática se considera como la repetición de nucleación y crecimiento de microscópicas fisuras dúctiles. En la figura 1.22 se muestra un modelo de cuatro etapas de las características de la EA, asociada con el crecimiento dúctil a partir de la punta de una fisura.

Etapa I: Debido a la concentración de tensiones en la punta de la fisura, la deformación plástica se concentra alrededor de las partículas duras de segunda fase, tales como inclusiones no metálicas y precipitados. Las características de la EA en esta etapa es o emisión continua o emisiones tipo eventos de pequeña amplitud.

Etapa II: El incremento de la concentración de tensiones produce la fisuración y/o decohesión de las partículas de segunda fase, lo cual provoca la nucleación de huecos ("voids"). Este proceso produce emisión tipo evento, y su amplitud varía dependiendo de la forma y dimensión de las partículas.

Etapa III: Los huecos nucleados en la etapa previa crecen por deformación plástica, de modo que la característica de la EA es la misma que en la etapa I. En



materiales dúctiles, los huecos siguen creciendo hasta que huecos adyacentes se juntan formando "cuellos" entre ellos.

Etapa IV: En los materiales menos dúctiles, la coalescencia de los huecos se produce por la formación de hoyuelos ("dimples") equiaxiados. Se considera que este proceso se produce rápidamente y por lo tanto puede producir emisiones tipo evento con gran amplitud. Los huecos formados delante de la punta de la fisura, finalmente se conectan con la fisura primaria.

Así, las fisuras dúctiles crecen por la repetición de las etapas I a IV.

Las inclusiones de MnS tienen un importante efecto en las propiedades mecánicas de los aceros, porque ellos son elongados en la dirección de laminación.

Ono et al.<sup>[1-39]</sup> encontraron para aceros ensayados en dirección longitudinal, y transversal, que la actividad de EA depende no sólo del contenido de sulfuro, sino también de la proyección del área de las inclusiones. Encontraron también una correlación directa entre la distribución del tamaño de las inclusiones y de la amplitud de la EA, y también otra entre el número de eventos de EA observados y el número de inclusiones. Ellos estimaron el mínimo tamaño de inclusión detectable por EA como de  $40\mu\text{m}$ , allí también atribuyeron el origen de los eventos de EA a la decohesión de las inclusiones achatadas de MnS. Ono y otros asumieron que debido al gran número y la pequeña amplitud de las emisiones de la rotura de cementita en perlita, no podrían distinguirse de la emisión continua asociada con la deformación plástica. En aceros de bajo y medio contenido de carbono, la deformación de la perlita también reduce la probabilidad de la rotura rápida de la cementita laminar.

Gerberitch et al.<sup>[1-40]</sup> ensayaron a la fractura aceros de alta resistencia (baja ductilidad), y propusieron un modelo simple para explicar la correlación entre la EA observada y el proceso de crecimiento de fisura dúctil. Al hacer un gráfico de la distribución de amplitudes de los eventos de EA encontraron dos grupos (grupo I y grupo II). El primer grupo está caracterizado por un gran número de emisiones de pequeña amplitud, el segundo grupo está caracterizado por un pequeño número de emisiones de gran amplitud. El proceso se muestra esquemáticamente en la figura 1.23. Pequeñas fisuras semielípticas,  $\Delta A_{Ii}$ , se forman primero en la punta de una fisura primaria y se propagan a lo largo de la dirección del espesor. Seguidamente, el área sombreada,  $\Delta A_{II}$ , se rompe, y se produce la unión de las pequeñas fisuras,  $\Delta A_{Ii}$ , y la fisura primaria se extiende en  $2V_c$ . La EA en el grupo I se correlaciona con la formación de las pequeñas fisuras redondeadas, y la EA en el grupo II se correlaciona con la unión de estas pequeñas fisuras por  $\Delta A_{II}$ .

## 1.8 - Fundamentación del trabajo

El Grupo de Ondas Elásticas de la Unidad de Actividad Ensayos No Destructivos y Estructurales de la CNEA, donde se desarrolló el presente Trabajo de Tesis, existe desde 1987. Su Director se inició en el tema de la EA a comienzos de la década del 70.

A lo largo de todos estos años hasta el presente, este grupo demostró a nivel nacional e internacional, su dominio y liderazgo en el tema de la EA en la Argentina, mediante la presentación de numerosos trabajos en publicaciones periódicas y congresos internacionales. También ha recibido el reconocimiento a través de la solicitud de asesoramiento en temas específicos por parte de distintas Instituciones Oficiales y empresas industriales. Cabe destacar el hecho de que es el grupo con mayor número de integrantes, que trabaja en la Argentina en forma continua en el tema de la EA.

Como se ha explicado detalladamente en las secciones anteriores, hay gran cantidad de literatura acerca de la EA en aceros, pero casi exclusivamente en ensayos uniaxiales.

Dado que en la mayoría de los casos, ésta no es la situación real de los materiales usados en la industria, se decidió estudiar la EA en tubos el acero sin costura, usados en la industria petrolera como encamisado de la trepanadora en los estudios de prospección de suelos, contribuyendo de este modo al conocimiento de los fenómenos físicos involucrados en producción de la EA en ensayos triaxiales.

Debido a la complejidad de los fenómenos involucrados en los procesos triaxiales, es virtualmente imposible que analizando las partes individuales, es decir cada una de las posibles fuentes de EA, se alcance la comprensión global de toda la EA recogida. Por lo tanto se aborda aquí el análisis desde el punto de vista estadístico o empírico, es decir, basándose en la incompleta información disponible, se halla y justifica un modelo estadístico para explicar la EA en estos tubos.

Para el logro del objetivo indicado, se diseñó el siguiente plan de trabajo.

- Búsqueda de antecedentes internacionales.
- Diseño de los ensayos y construcción de los dispositivos experimentales necesarios (dispositivo para deformar los aros, celda de carga, etc).
- Construcción y caracterización de las probetas con forma de aro.
- Realización de los ensayos, deformando las probetas y recogiendo la EA producida.
- Estudio y análisis de los resultados de la EA obtenida.
- Búsqueda de explicaciones físicas de los resultados.
- Escritura del trabajo realizado

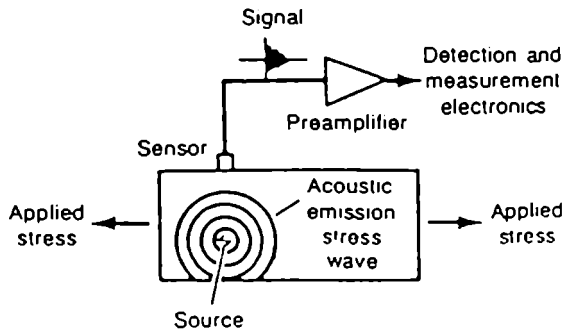


Figura 1.1: Producción de Emisión Acústica (Ref. [1-2]).

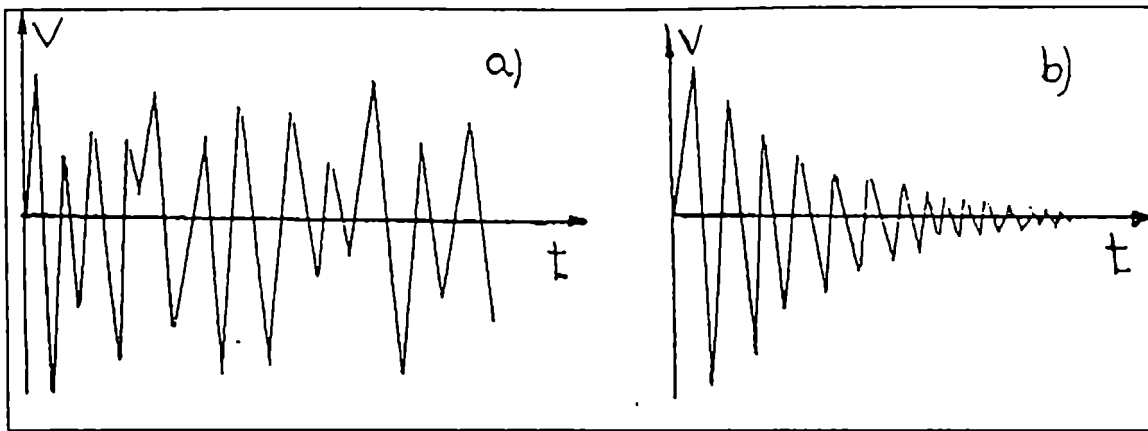


Figura 1.2: a) Emisión Acústica continua, b) Emisión Acústica discreta (evento).

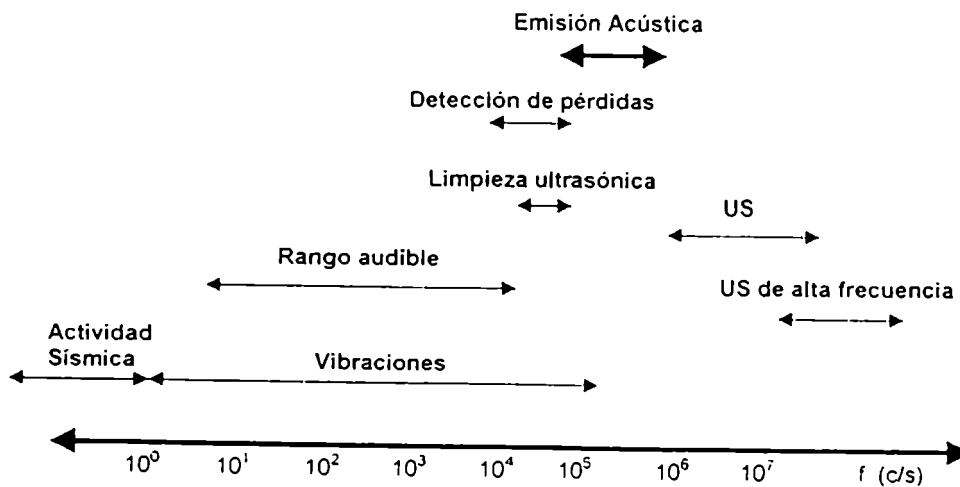


Figura 1.3: Rango de frecuencias de los movimientos oscilatorios.

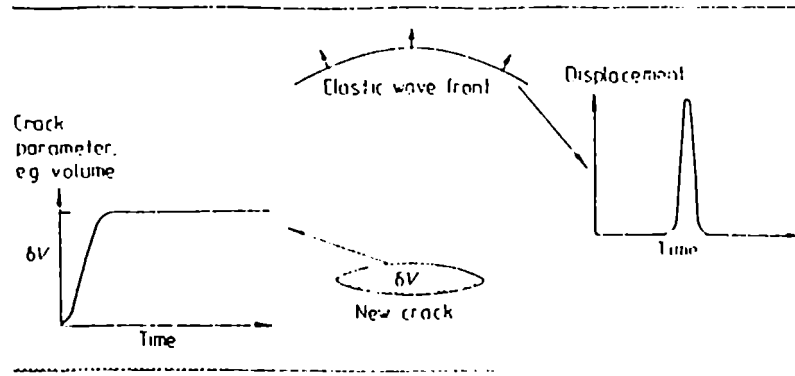


Figura 1.4: Aparición de una nueva fisura, variación de volumen y desplazamiento (Ref. [1-1]).

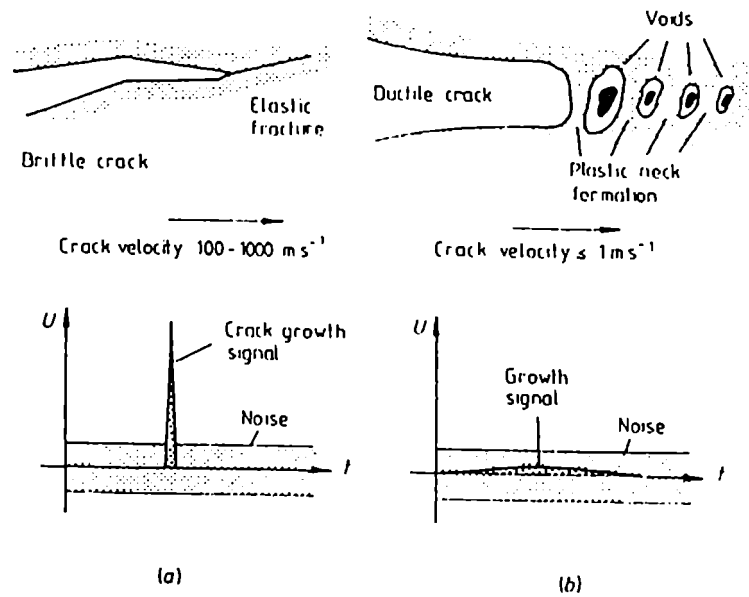


Figura 1.5: a) Propagación de fisura frágil, b) propagación de fisura dúctil (Ref. [1-1]).

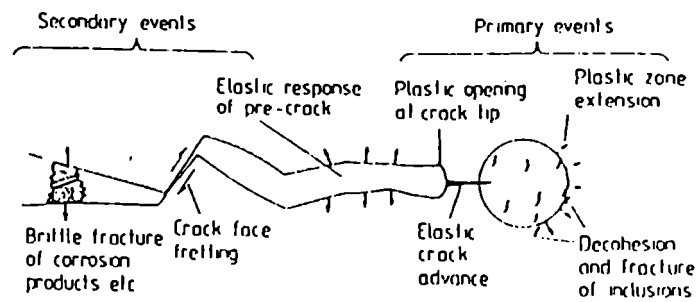


Figura 1.6: Fuentes primarias y secundarias de EA (Ref. [1-1]).

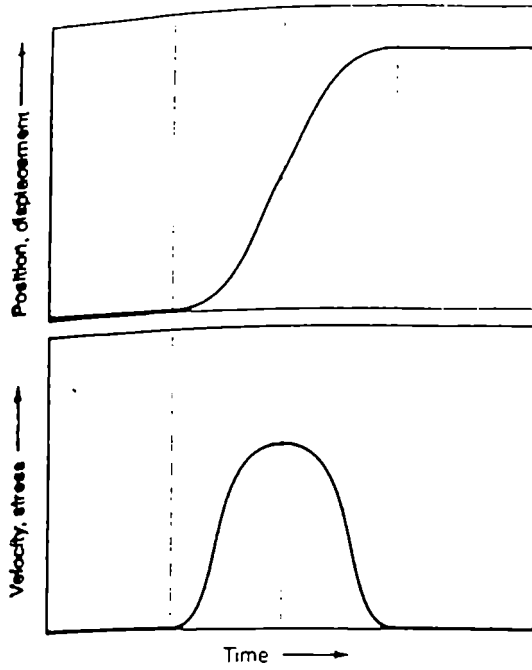
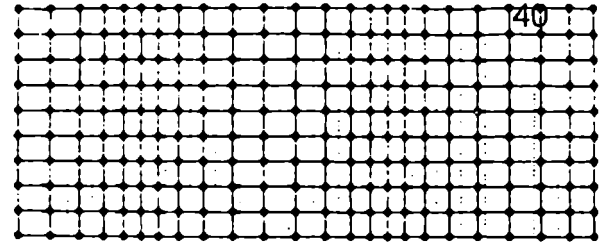
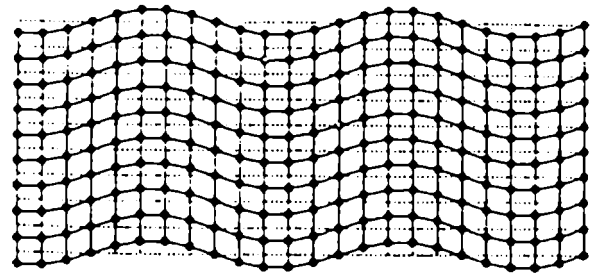


Figura 1.7: Evolución temporal de un pulso de tensión (Ref.[1-2]).



(a)



(b)

Figura 1.8: Ondas de volumen, a) longitudinales, b) transversales (Ref. [1-17]).

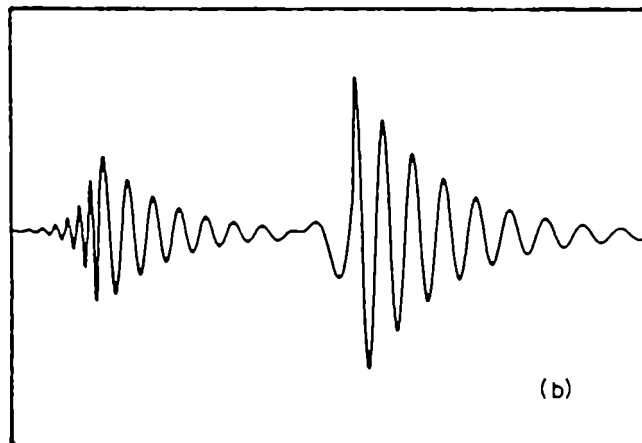
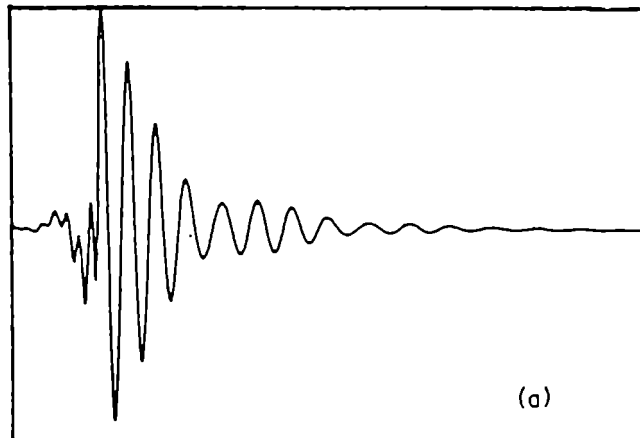


Figura 1.9: Efecto de las distintas velocidades, a) onda original, b) onda a cierta distancia de la fuente (Ref. [1-17]).

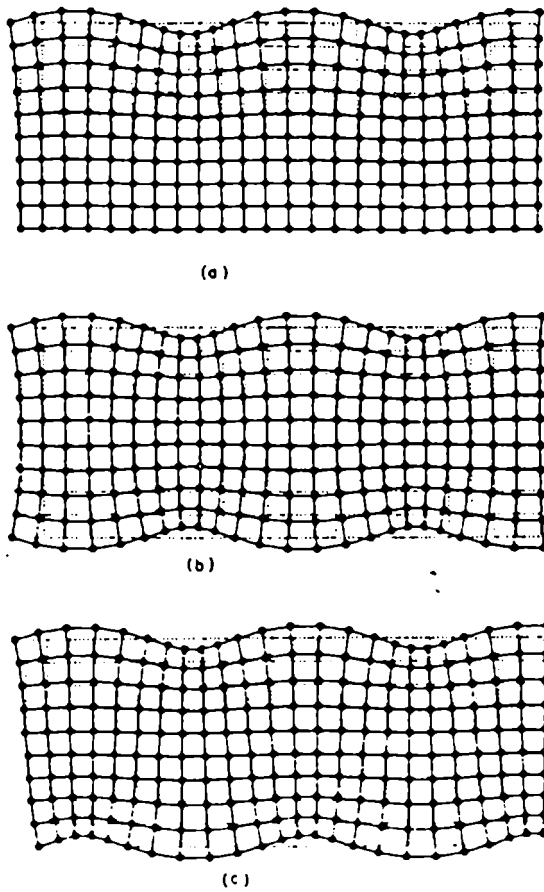


Figura 1.10: Movimiento de las partículas, a) ondas de superficie, b) ondas de superficie simétricas, c) ondas de superficie antisimétricas (Ref. [1-17]).

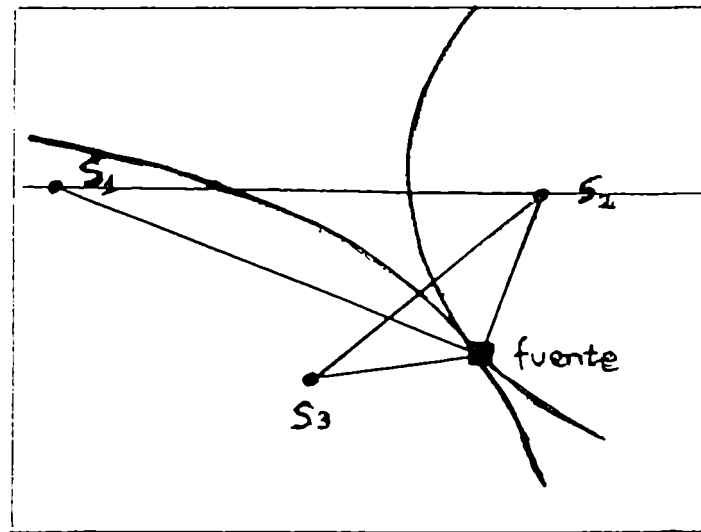


Figura 1.11: Método de las hipérbolas para ubicación de fuente

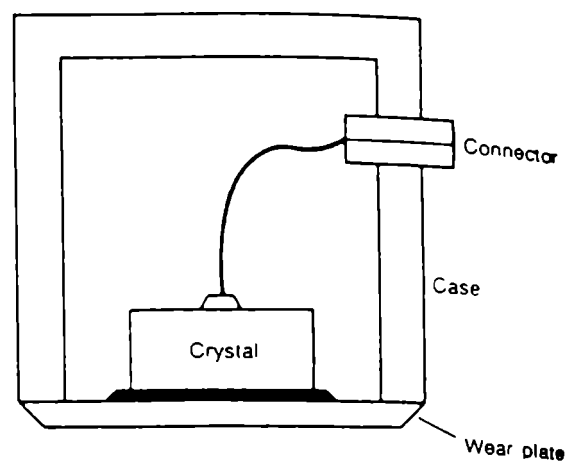


Figura 1.12: Sensor piezoeléctrico (Ref. [1-17]).

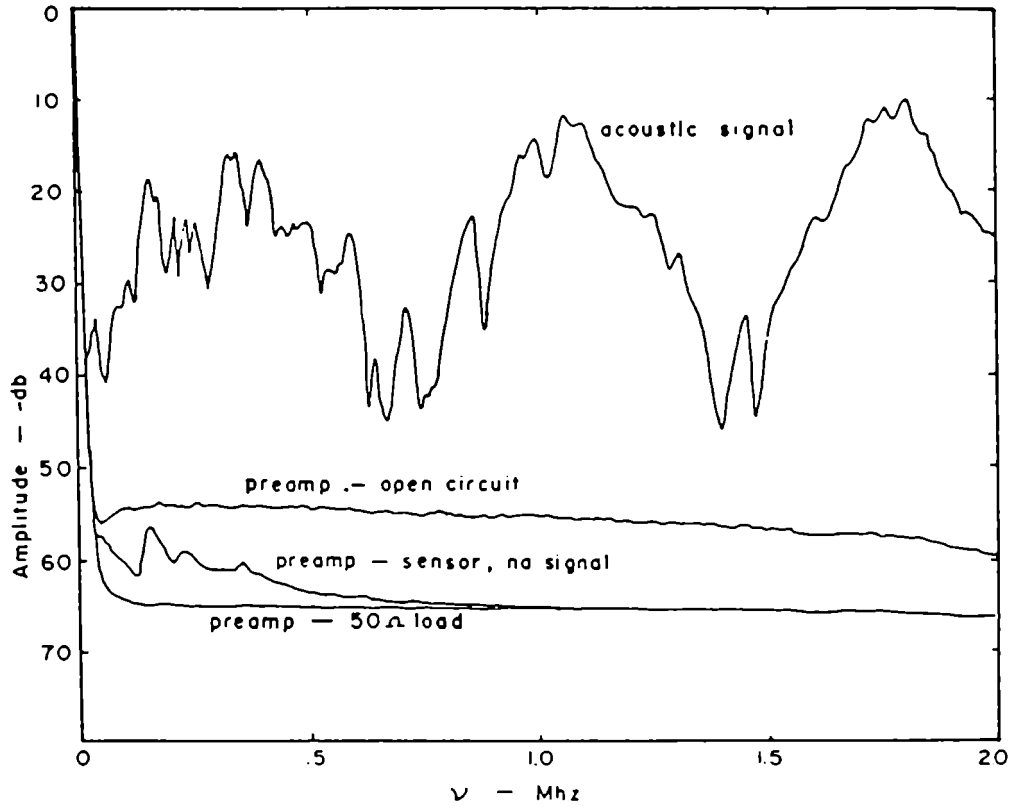


Figura 1.13: Típica curva de calibración de un sensor piezoeléctrico resonante (Ref. [1-17]).

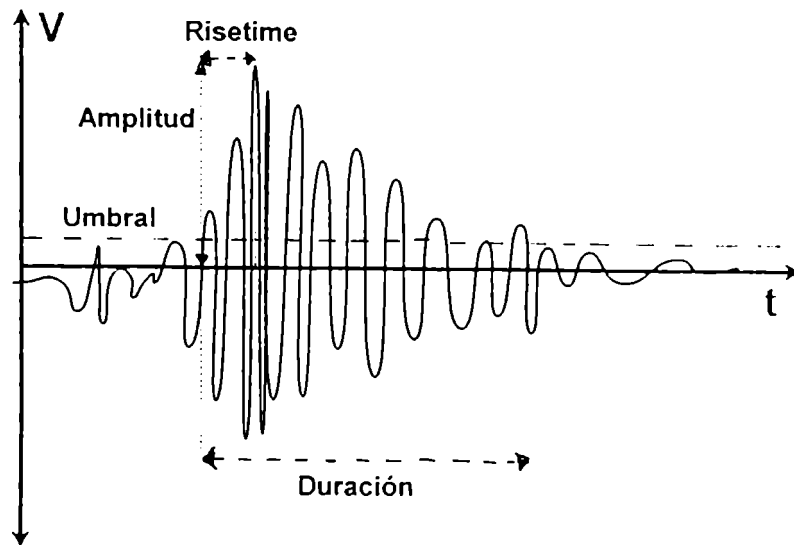


Figura 1.14: Evento de EA y sus parámetros.

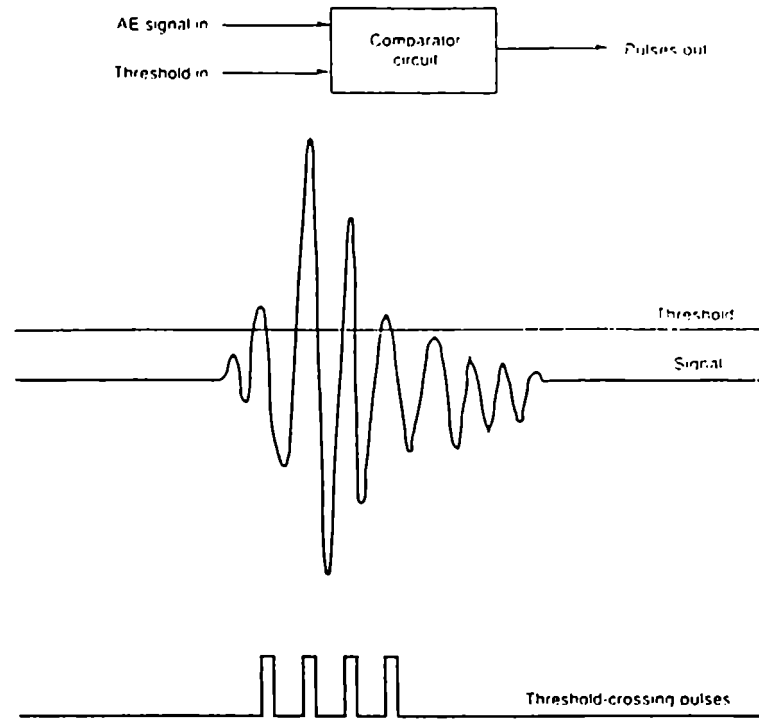


Figura 1.15: Detección del cruce del umbral de una señal de EA (Ref. [1-2]).

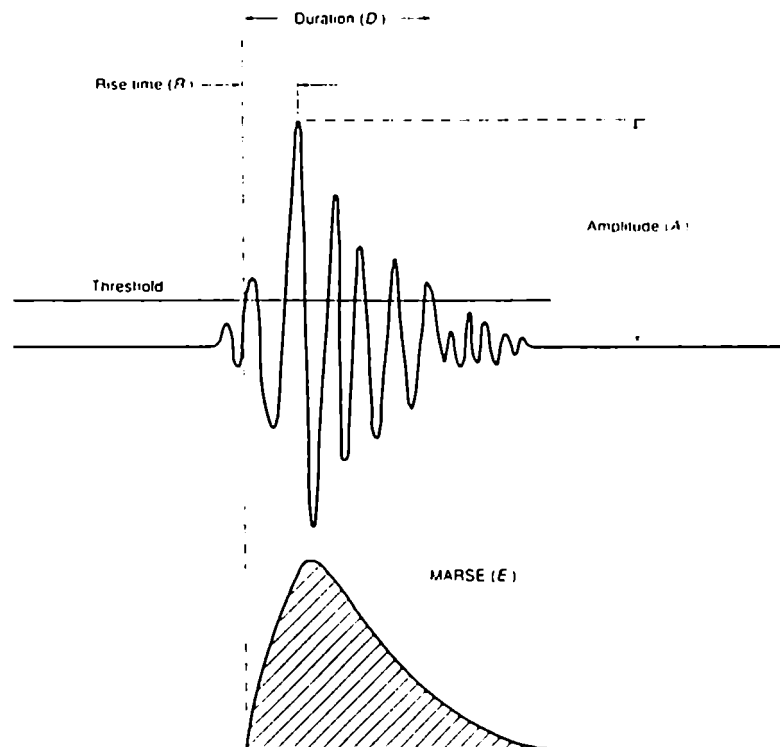


Figura 1.16: Envoltura de una señal de EA (Ref. [1-2]).



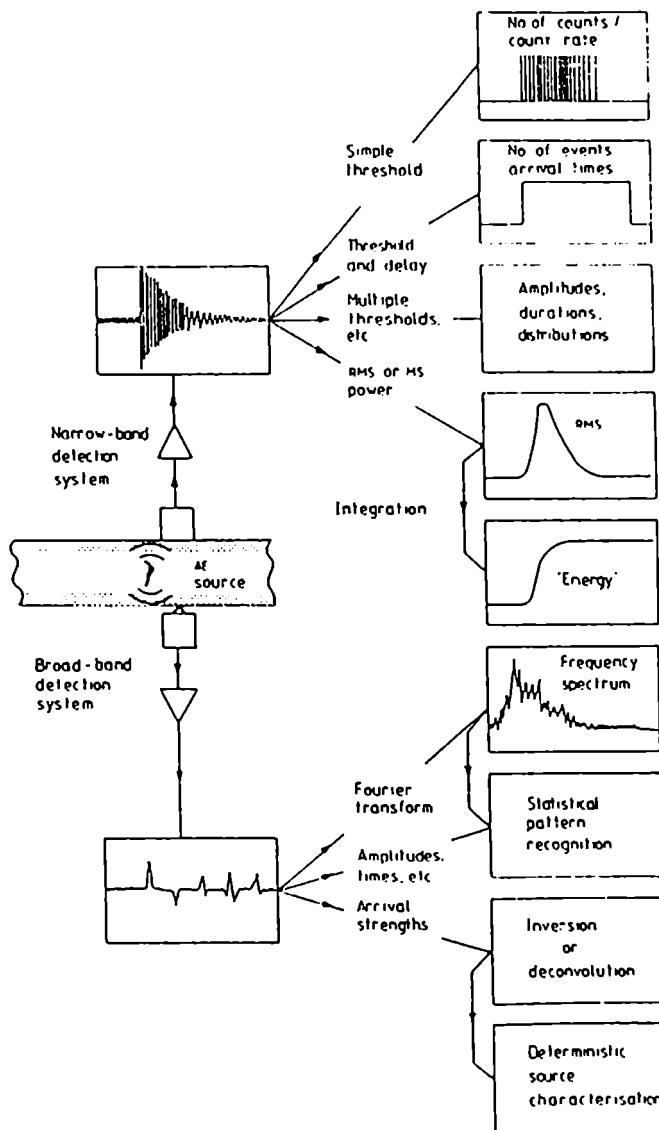


Figura 1.17: Distintos métodos de análisis de señales de EA (Ref. [1-1]).

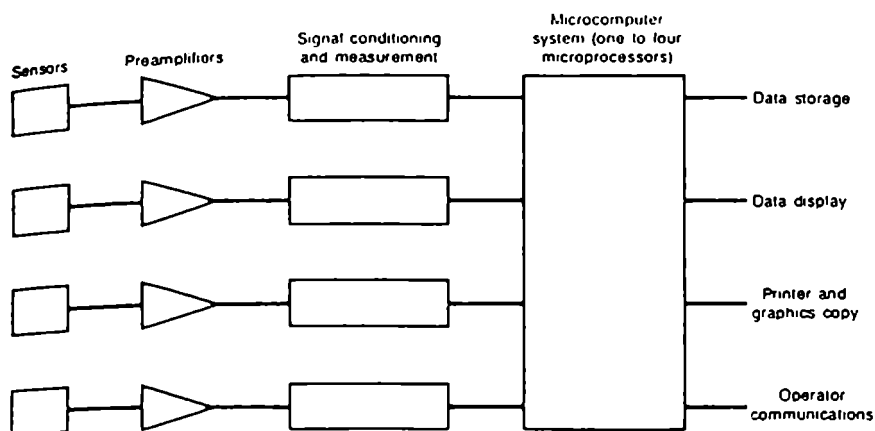


Figura 1.18: Diagrama en bloque de un equipo de EA (Ref. [1-2]).

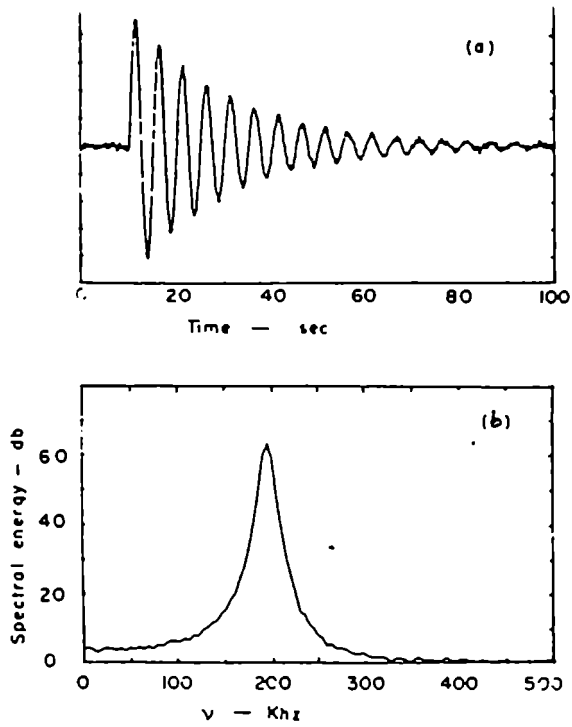
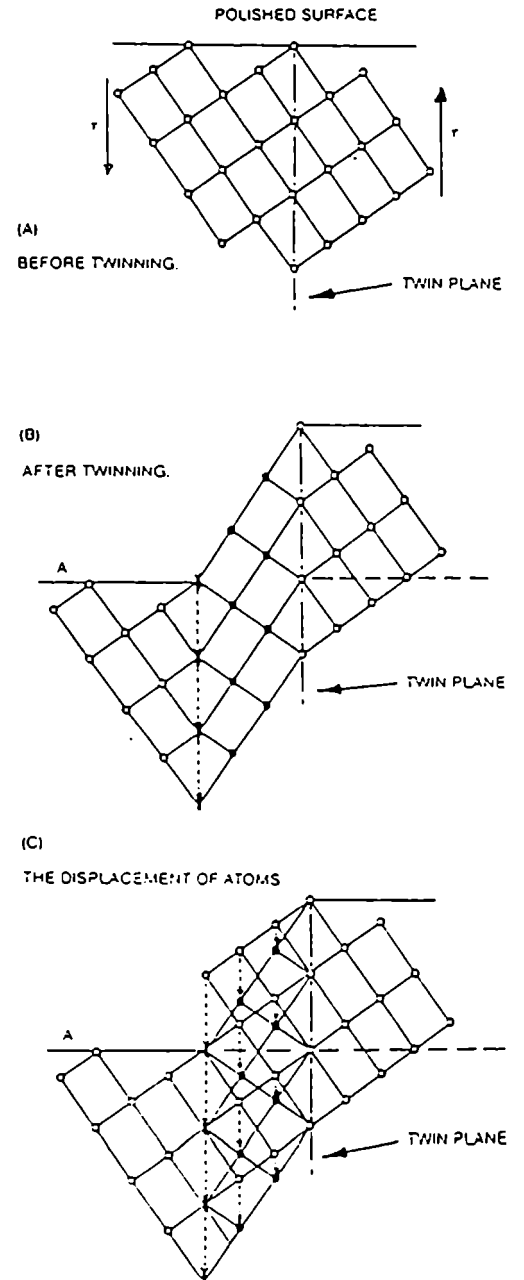


Figura 1.19: (a) Onda sinusoidal amortiguada, (b) transformada de Fourier.

Figura 1.20: Representación clásica del maclado, (A) antes del maclado, (B) después del maclado, (C) desplazamiento de los átomos (Ref. [1-30]).



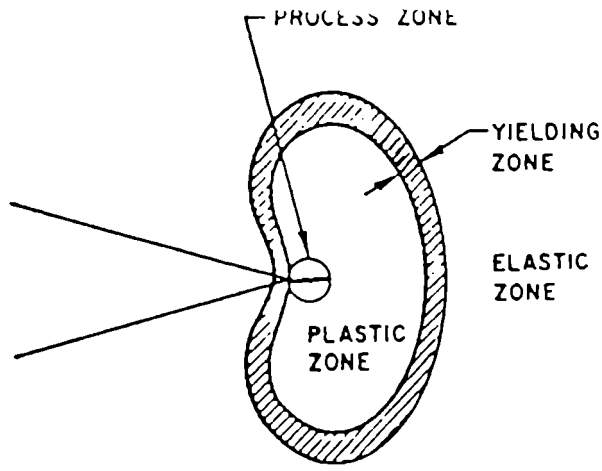



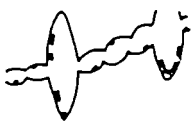


Figura 1.21: Zonas que contribuyen a la EA en una fisura dúctil (Ref. [1-38]).

Figura 1.22: Etapas del proceso de fractura dúctil (Ref. [1-38]).

Fracture Process	Possible AE
 <p>Plastic def due to Stress Cocent. stage I</p>	Continuous
 <p>Inclusion Crackg. and Decohesion stage II</p>	Burst
 <p>Void Growth (Plastic Def.) stage III</p>	Continuous
 <p>Void Coalescence stage IV</p>	Burst

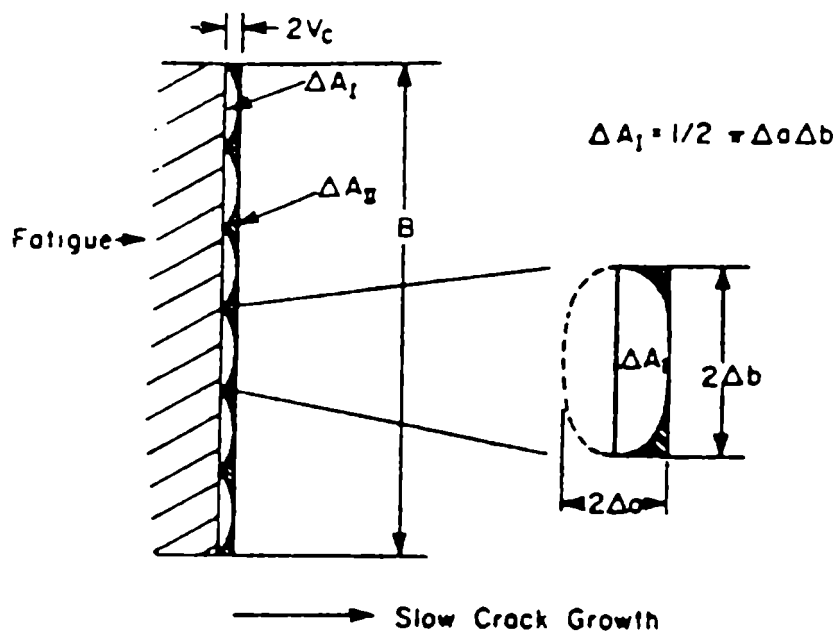


Figura 1.23: Modelo esquemático del crecimiento de una fisura dúctil (Ref. [1-38]).

## 2. DISEÑO EXPERIMENTAL

*En este Capítulo se describen los ensayos realizados y los dispositivos especialmente diseñados y construidos. También se detallan las características del equipo de EA y las condiciones experimentales empleadas.*

### 2.1 - Descripción de los ensayos

En el desarrollo de esta tesis, se usaron probetas cortadas de tubos sin costura de acero microaleado (su composición química se indica más adelante), usualmente empleados en la industria petrolera, su estado de tensiones triaxial se corresponde con la realidad del uso industrial de los mismos.

Los aros tienen 14 cm de diámetro exterior, 1.5 cm de espesor y 2 cm de ancho (las dimensiones características de cada probeta se indican posteriormente). Los aros, a los cuales se les elimina un sector de aproximadamente 6 cm de longitud de cuerda, se colocan sobre un dispositivo especial que permite deformarlos, registrando a) la fuerza ejercida, mediante una celda de carga, b) la abertura de las mordazas, mediante un potenciómetro, y c) la EA producida. En la figura 2.1 se ve un esquema del dispositivo.

Sobre los extremos del aro se colocan dos sensores de EA resonantes, estos sensores actúan como "guardas", eliminando la EA espúrea que se produce por fricción en las mordazas o el tornillo que transmite el movimiento de deformación. En la parte superior, donde se concentra la deformación, a 1 cm del eje de simetría axial, (para evitar el movimiento relativo del sensor), se coloca un sensor de EA de banda ancha que es el que capta la verdadera información de EA del material.

Para el acople entre el sensor y la superficie del metal se utilizó grasa de vacío.

Después de distintas pruebas con varios materiales, la mejor sujeción de los sensores a la probeta, se logró con cinta aisladora plástica común.

Las señales de los tres sensores de EA, de la celda de carga, y del potenciómetro fueron recibidas, analizadas, procesadas y elaboradas por el sistema de EA AEDOS ("Acoustic Emission Overseeing System").

Sólo en los últimos ensayos, se pudo digitalizar las señales de EA, mediante el osciloscopio digital LeCroy 930. Cabe mencionar que el análisis de estas digitalizaciones no forma parte de este Trabajo de Tesis.

A continuación se describen los elementos más importantes del montaje de los ensayos.

## **2.2 - Dispositivo para abrir los aros**

Para poder ejercer la fuerza que permite deformar las probetas con forma de aros, se diseñó y construyó un dispositivo especial.

Los extremos del aro se colocan sobre las mordazas del dispositivo, una es fija y la otra móvil. Un tornillo que atraviesa la mordaza que se desplaza, permite ejercer la fuerza para abrirlos en forma manual. Para poder medir la fuerza ejercida, se diseñó y construyó en el laboratorio una celda de carga. La misma está ubicada entre la mordaza fija y un extremo del tornillo. En el otro extremo del tornillo, mediante una manija, se ejerce la fuerza. Para medir la separación de los extremos del aro, se vinculó mediante una cadena y engranajes, el movimiento del tornillo a un potenciómetro que produce un valor de resistencia variable. En la figura 2.2 se ve una foto del dispositivo completo, con la celda de carga, el potenciómetro y la probeta con los tres sensores de EA.

Para lograr una velocidad de deformación uniforme, se implementó un sistema con un motor eléctrico de potencia y un reductor de velocidad. Las pruebas realizadas demostraron que el ruido eléctrico generado interfería con las señales de EA, de modo que era necesario elevar demasiado el umbral de detección, perdiendo así muchas de las señales de EA.

Finalmente este sistema fue descartado, ejerciéndose la fuerza sobre el tornillo del dispositivo en forma manual, con una velocidad constante de valor medio: 1.3 cm/min). Como el mecanismo de generación de eventos de EA no se altera por un cambio en la velocidad de deformación, siempre que este cambio no involucre una variación en el orden de magnitud, no varía la velocidad de producción de eventos (ver sección 1.7).

## **2.3 - Celda de carga**

La celda de carga fue diseñada especialmente, ya que ninguna celda comercial podía ser adaptada para este uso particular.

Fue construida sobre un cilindro de acero 1010, de 2 cm de altura, 1 cm de diámetro exterior y 0.2 cm de espesor. Las tapas, de acero más duro, 1040, tienen, una de ellas, una saliente para permitir su encastre en la mordaza del dispositivo y la otra, una concavidad para que sirva de cuna al tornillo. En la figura 2.3 se puede ver un esquema de la celda de carga con sus dimensiones. Sobre la superficie cilíndrica exterior, previamente lijada hasta papel 600 (para garantizar una muy buena adherencia), se pegaron, siguiendo los distintos pasos de la técnica apropiada, 4 "strain gauges" especiales para acero, que trabajan en el rango elástico<sup>[2-1, 2-2]</sup>. En la tabla 2-1 se indican las principales características de los "strain gauges" seleccionados.

Tabla 2-1: características de los "strain gauges".

Marca	Tipo	Longitud de medición	Resistencia	Factor de medición
TML	FLG-1-17	1 mm	120±3 Ohms	2.12

Para optimizar la sensibilidad de la celda, y disminuir el error, dos "strain gauges" fueron pegados en la dirección axial, simétricamente; los otros dos se pegaron en la dirección circunferencial, también en forma simétrica, de forma que el eje longitudinal de cada uno de ellos estuviera a 90° del próximo. Para protegerlos, una vez pegados y unidos a los correspondientes terminales eléctricos, se los cubrió con pegamento transparente de dos componentes (Poxipol). Cada uno de los "strain gauges" forma una rama de un puente de Wheatstone completo. Con esta configuración se consigue compensar las variaciones por temperatura y humedad. Los "strain gauges" que más se deforman a la compresión fueron conectados en la misma rama del puente, y los otros dos en la otra.

Mediante el equipo HOTTINGER BALDWIN MESSTECHNIK (HBM) AE3407B, con módulo amplificador KWS350, se proveyó la tensión de alimentación al puente completo, dando como salida una tensión continua proporcional al desbalance del puente, causada por la compresión de la celda. Cada uno de los cables de las ramas del puente debió ser soldado convenientemente al conector especial del equipo HBM. Como tensión de alimentación se usó 5 V.

Al ejercerse una fuerza sobre las tapas del cilindro de la celda de carga, se deforma el material y se produce un desbalance sobre el puente de Wheatstone, siendo éste proporcional a la carga aplicada.

Para poder hacer la lectura directa en unidades de fuerza, la celda fue calibrada convenientemente.

Para dicha calibración se usó una máquina de tracción INSTRON Model 1125 con posibilidad de carga máxima de 500 Kgf, y error absoluto de ±1 Kgf. Las lecturas de tensión eléctrica se hicieron mediante un tester digital, con un error absoluto de ±0,001 V. La calibración se repitió para carga y descarga, desde 0 Kgf hasta 200 Kgf.

En la figura 2.4 se muestra la curva de calibración, y la recta hallada por análisis de regresión lineal. De la pendiente de dicha recta se obtuvo la constante  $K_1$  de la celda:

$$K_1 = 0.14 \text{ Kgf/mV}$$

Con este valor de  $K_1$  se pueden traducir a unidades de fuerza, los valores de tensión eléctrica que ingresan como primer parámetro externo al sistema de EA.

## **2.4 - Abertura de las mordazas**

Para medir la separación de los extremos del aro se diseñó un sencillo sistema con un potenciómetro de 10 vueltas, cuya resistencia varía a medida que se gira el tornillo que separa las mordazas. La resistencia máxima del potenciómetro es de 2 KOhms. El movimiento de las mordazas donde se calzan las probetas, se transmitía al potenciómetro por medio de engranajes unidos por una cadena metálica.

Como alimentación del potenciómetro se empleó una tensión continua constante de 6 V provista por una fuente de tensión regulada KENWOOD PR18-1.2.

La calibración del potenciómetro se hizo midiendo la separación, relativa a la posición inicial, y leyendo la correspondiente tensión eléctrica. Así se obtuvo la constante  $K_2$ :

$$K_2 = 0.001 \text{ cm/mV}$$

Con este valor de  $K_2$  se pudo traducir a unidades longitud, los valores de tensión eléctrica que ingresaban como segundo parámetro externo al sistema de EA.

## **2.5 - Transductores de EA**

El transductor se utiliza para convertir la onda acústica generada en el objeto de observación, en una señal eléctrica. Tal como se explicó en el capítulo anterior, el componente principal es un cristal piezoeléctrico (PZT).

Para mejorar la relación señal-ruido, la salida es diferencial, a través de un cable coaxial con conector BNC Twinaxial.

La lámina de alúmina de la base del transductor, aísla eléctricamente el cristal de la superficie donde se coloca el sensor y proporciona una superficie dura para el acople del sensor.

En el estudio desarrollado en este Trabajo de Tesis, se usaron tres transductores piezoeléctricos, dos de ellos resonantes y uno de banda ancha.

### **2.5.1 - Sensor resonante**

Los dos sensores "guardas", usados para desechar las señales que arribaran primero a ellos, son marca CISE, N° 355 y N° 358 con 200 KHz de frecuencia de

resonancia, con conector diferencial. En la figura 2.5 se pueden ver las correspondientes curvas de respuesta en frecuencia.

### **2.5.2 - Sensor de banda ancha-**

Para registrar la EA producida dentro del material de las probetas, se usó un sensor de banda ancha, marca PAC (Physical Acoustic Corporation), WD-942, con conector diferencial. En la figura 2.6 se muestra la respuesta en frecuencia, de allí puede asumirse que la transferencia es aproximadamente constante entre 350 KHz y 800 KHz. El uso de un sensor de banda ancha, prevé en el futuro la posibilidad de realizar el análisis de las señales digitalizadas.

### **2.6 - Preamplificadores**

Los preamplificadores, externos al sistema AEDOS, son de ganancia fija, 40 dB, y de bajo ruido. Necesitan una alimentación de 24 Vcc (tensión continua), que es enviada por el mismo cable que transporta la salida de la señal (tensión alterna de alta frecuencia). El conector de ingreso de la señal es diferencial polarizado, BNC Twinaxial, y el de salida es un BNC convencional. El ancho de banda es de 50 KHz hasta 1 MHz. El nivel de ruido a la entrada del preamplificador es de aproximadamente 1  $\mu$ V.

En estos ensayos se usaron los preamplificadores CISE N° 355 y 358.

### **2.7 - Sistema de EA**

Para la caracterización y el estudio de la EA se usó el equipo AEDOS de la empresa italiana CISE. El sistema AEDOS, fue diseñado para el análisis cuantitativo de las emisiones de tipo discreto. Partiendo de la señal eléctrica provista por el transductor piezoeléctrico, el sistema integra todas las funciones necesarias y suficientes para la caracterización más general del fenómeno de EA<sup>[2-3]</sup>.

Para lograr la caracterización completa de un evento producido por una fuente de EA, el AEDOS está organizado en las cuatro secciones siguientes:

a) sección de traducción



b) sección de tratamiento individual de la señal del sensor. Las secciones a) y b) representan la parte del equipo denominada "Front End".

c) sección de gestión centralizada de cada evento de EA.

d) sección elaboradora de datos adquiridos después del tratamiento individual del Front End.

En la figura 2.7 se muestra un diagrama en bloque del equipo.

### **2.7.1 - Sección de traducción**

Esta sección está constituida por un número de sensores igual al número de canales necesarios en cada ensayo específico, siendo el máximo admisible de 8 canales. Para el transporte de la señal se usa cable coaxial de 50 Ohms/m. La alimentación (tensión continua de 24 V) del preamplificador es generada por el Front End y llega al sensor por el mismo cable que transporta la señal de EA (tensión alterna de alta frecuencia).

### **2.7.2 - Sección de tratamiento individual de la señal**

La señal proveniente de la fuente de EA, y convenientemente preamplificada llega luego a la sección de tratamiento individual, donde se envía a un amplificador de ganancia programable. Esta sección comprende una función de discriminación y de generación de señales lógicas que efectúa una serie de controles sobre la señal amplificada, a fin de hacer máxima la probabilidad de seleccionar sólo la señal que sea efectivamente generada por el fenómeno de EA.

La lógica de discriminación hace corresponder a una señal recibida por el módulo de tratamiento individual, la correspondiente señal de salida sólo si ésta cumple con todas las condiciones impuestas desde el software para asegurar que corresponda a un evento válido de EA.

### **2.7.3 - Sección de gestión centralizada**

Esta sección se encarga fundamentalmente del diálogo entre el Front End y la computadora para la caracterización de cada evento de EA.

Debido a que la velocidad de propagación de la perturbación es finita, existirá un canal primero "golpeado" (activado), el más cercano a la fuente, sobre el cual será más real medir las características de la señal. Amplitud, Duración y Tiempo de Subida ("Risetime"). Antes de medir estos parámetros, verifica que ese canal no haya sido definido como "guarda", en cuyo caso descarta esa medición.

En el caso en que se haya definido un parámetro externo, es decir, un valor de tensión continua (+10V, -10V), que responda a la variación de alguna magnitud que cuantifique la sollicitación ejercida sobre la probeta ensayada (presión, fuerza, etc.), también es registrado.

La gestión centralizada provee las siguientes funciones:

- medición del tiempo absoluto,
- generación de una salida de trigger para un osciloscopio,
- interfase para un registrador externo,
- salida de la señal del primer canal golpeado que cumple los requisitos impuestos previamente.

Para dar un instrumento concreto de ayuda para la preparación del ensayo, el AEDOS está dotado de un simulador de fuentes de EA, que produce impulsos a repetición, de amplitud variable.

Otro dispositivo auxiliar, es un conversor de audio, que bajando la frecuencia de las señales de EA las transforma en audibles, manteniendo la proporcionalidad con la amplitud de la señal convertida. Este aspecto es muy útil ya que representa una forma muy sencilla de reconocer cualitativamente la EA.

#### **2.7.4 - Sección elaboradora de datos**

Al comienzo, el programa del AEDOS, inicializa la experiencia con los requerimientos impuestos por el operador. Luego, al comenzar el ensayo, partiendo de los datos recibidos, la calculadora central (VAXstation II/GPX, con sistema operativo UNIX), graba los datos en el disco rígido y permite la visualización de los mismos en la pantalla de la computadora, a través de varias presentaciones.

#### **2.7.5 - Amplificadores**

La señal proveniente del preamplificador es amplificada en un rango variable desde 0 hasta 50dB, como máximo, con pasos de 2 dB, desde la computadora. En esta etapa se separa y filtra la tensión continua de 24V de alimentación al preamplificador, que viene por el mismo cable que transporta la señal proveniente del sensor.

### 2.7.6 - Características eléctricas del AEDOS

#### a) Señal analógica:

Ganancia. Programable de 0 a 50 dB en pasos de 2 dB.

Banda pasante (evaluada a -3dB): de 10 a 1000 KHz.

Tensión de ingreso: máx.  $\pm 10V$ .

Impedancia característica de entrada: 50 Ohm

Resolución de la medición: 12 bit en los  $\pm 10Vp$ .

#### b) Umbral:

Programable como ganancia de 0 a 30 dB, en pasos de 2 dB, referidos a 50 mV.

#### c) Ingresos paramétricos:

Ganancia: programable de 0 a 50 dB, en pasos de 2dB.

Offset: programable de -10V a +10V.

Banda pasante: de 0 a 1Hz.

Tensión de ingreso; máx.  $\pm 10V$ .

Impedancia de entrada: 100 KOhm.

Resolución de la medición: 12 bit en los  $\pm 10V$ .

#### d) Resolución temporal: 1 $\mu$ s

Las interfaces digitales trabajan con una resolución de 8 bits.

El reloj interno del equipo trabaja con un resolución de 1 $\mu$ s, aplicable a todas las mediciones de tiempo.

Para las mediciones de tensión eléctrica la resolución es de 1 mV, aplicable a la medición de la amplitud y los valores de los parámetros externos.

### 2.7.7 - Características del software

El software empleado es parte intrínseca del sistema de EA AEDOS y fue desarrollado por la empresa proveedora del equipo. A continuación se describen los principales datos de entrada del programa y la presentación de los resultados.

### 2.7.8 - Datos de entrada

El sistema trabaja con una serie de menús interactivos. El más importante es el que define las condiciones generales en que se harán las mediciones.

A continuación se detallan los principales parámetros que deben ser elegidos.

Número de canales activos: cantidad de canales de EA que se usarán.

Número de parámetros activos: cantidad de parámetros externos que se usarán.

Delta-T max : máximo tiempo que puede tardar la señal en recorrer la distancia entre los sensores en uso. Se calcula teniendo en cuenta la velocidad de propagación de las ondas y la distancia entre sensores. Con este tiempo se logra considerar la señal de EA que arribó a cada canal por el camino más corto.

Tiempo de Protección de la Duración (TPD): dado que la señal de EA es oscilatoria, es necesario definir un "tiempo típico", para tener en cuenta cuándo la próxima excursión de la tensión eléctrica, pertenece o no a la misma señal. Este tiempo es el máximo intervalo en el que la señal puede permanecer debajo del umbral, para considerar que la próxima oscilación pertenece a la misma señal. Está relacionado con la frecuencia de resonancia del sensor empleado, se calcula como 20 veces la inversa de la frecuencia de resonancia del sensor. El valor estándar es de 100 $\mu$ s.

Tiempo de Protección (TP): las ondas de EA se reflejan en cada superficie o interfaces que encuentran en su camino, esto hace que, debido a la dispersión del medio, las ondas que llegan al transductor se vayan "estirando", existiendo la posibilidad de que algunas oscilaciones queden debajo del umbral un tiempo mayor que el TPD, y volviendo a aparecer, sean consideradas como otro evento de EA, siendo en realidad parte del mismo. Para tener en cuenta estas situaciones, se define el TP como el tiempo en que el sensor está "sordo" después que terminó la señal; actúa como un "tiempo muerto", ya que durante esos instantes el sensor está deshabilitado para recibir señales. De este modo se consigue eliminar la posibilidad de medir dos señales muy próximas como si fueran una sola. Para calcularlo hay que tener en cuenta las características geométricas del material donde se genera y propaga la EA. El valor estándar es de 8000 $\mu$ s.

Período de muestreo del parámetro externo: es el intervalo de lectura de los valores de los parámetros externos. El valor estándar es de 5 s. No obstante, debe aclararse que el equipo también registra los valores del parámetro externo, cada vez que se produce un evento de EA.

Indicaciones para cada canal:

- ganancia del amplificador, en pasos de 2 dB,
- valor del umbral, en dB referidos a 50 mV,
- indicación de canal "guarda",
- indicación para salida a un osciloscopio.

Indicaciones para los parámetros externos:

- ganancia del amplificador de la entrada paramétrica, en pasos de 2 dB
- valores de tensión mínimo y máximo (en mV).

### 2.7.9 - Datos de salida

El sistema AEDOS caracteriza la actividad de EA presentando la información principalmente a través de gráficos, histogramas y tablas. A continuación se detallan los más importantes:

- gráficos de evolución temporal de la cantidad acumulada de eventos de EA y del parámetro externo.
- histogramas de Amplitud, Duración y Tiempo de Subida ("risetime", R),
- histogramas del número de eventos en función del parámetro externo,
- histogramas del número de eventos en función de la energía,
- gráficos de la velocidad de eventos en función del tiempo,
- tabla de visualización, actualizada automáticamente, de los parámetros característicos de cada evento: número progresivo del evento, secuencia de canales golpeados y retardos relativos ( en  $\mu\text{s}$ ), Amplitud (en mV), Duración (en  $\mu\text{s}$ ), Tiempo de Subida (en  $\mu\text{s}$ ) y valores de los parámetros externos (en mV).

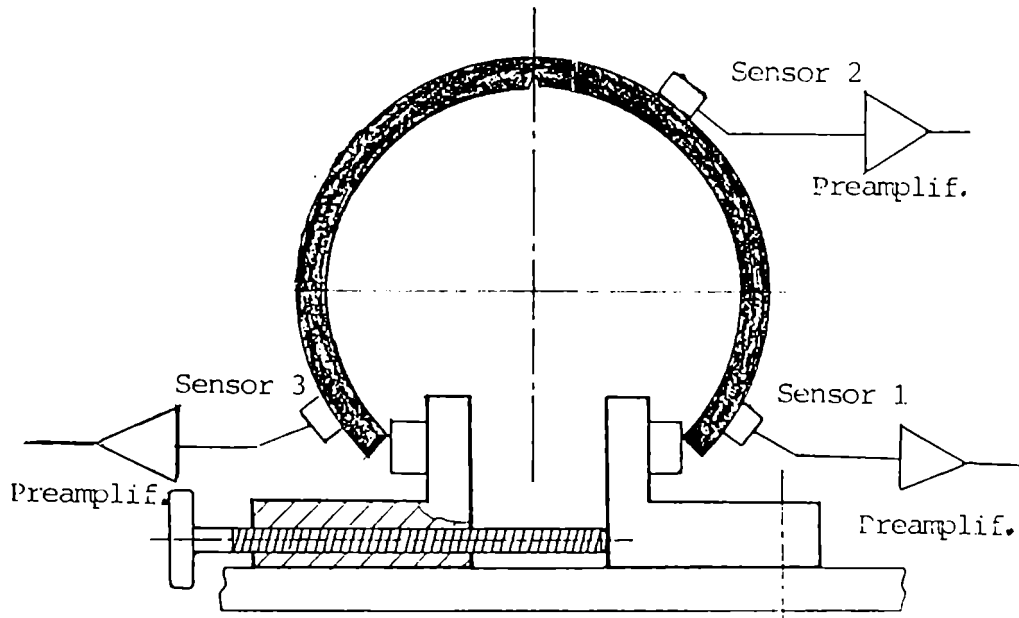
### 2.8 - Condiciones de trabajo en el equipo de EA

A continuación se detallan las condiciones de trabajo que fueron empleadas en el sistema de EA AEDOS:

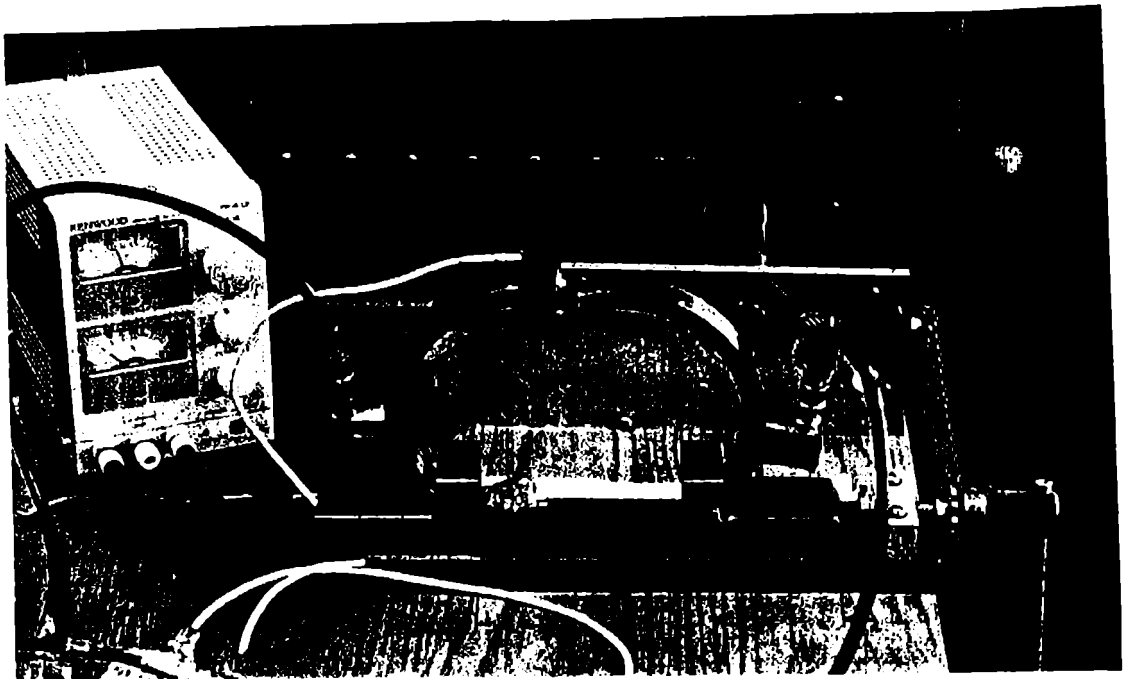
- a) Número de canales activos: 3.
- b) Número de sensores "guardas": 2.
- c) Sensores "guardas": resonantes (200 KHz).
- d) Ganancia de los preamplificadores: 40 dB.
- e) Ganancia de los amplificadores: los valores para cada ensayo se indican en la tabla 3.1 del próximo capítulo.
- f) Sensor principal: banda ancha (350 KHz a 800 KHz).
- g) Número de entradas paramétricas: 2.
- h) Ganancia de la entrada paramétrica 1 (celda de carga): 12 dB.
- i) Ganancia de la entrada paramétrica 2 (abertura): 0 dB
- j) Tiempo de Protección (TP): 64000  $\mu\text{s}$ .
- k) Tiempo de Protección de la Duración (TPD): 100  $\mu\text{s}$ .
- l) Período de muestreo paramétrico: 5 s.

El TP fue elegido con ese valor alto, debido a que las pequeñas dimensiones geométricas de las probetas, favorecen las reflexiones en cada interfaz. Así, se evita considerar reflexiones cercanas como señales de EA provenientes de distintas fuentes, cuando en realidad son sólo reflexiones de las ondas emitidas por la misma fuente.

En la figura 2.8 se muestra un diagrama en bloque de todo el sistema experimental empleado.



**Figura 2.1:** Esquema del dispositivo para deformar los aros.



**Figura 2.2:** Fotografía del dispositivo experimental.

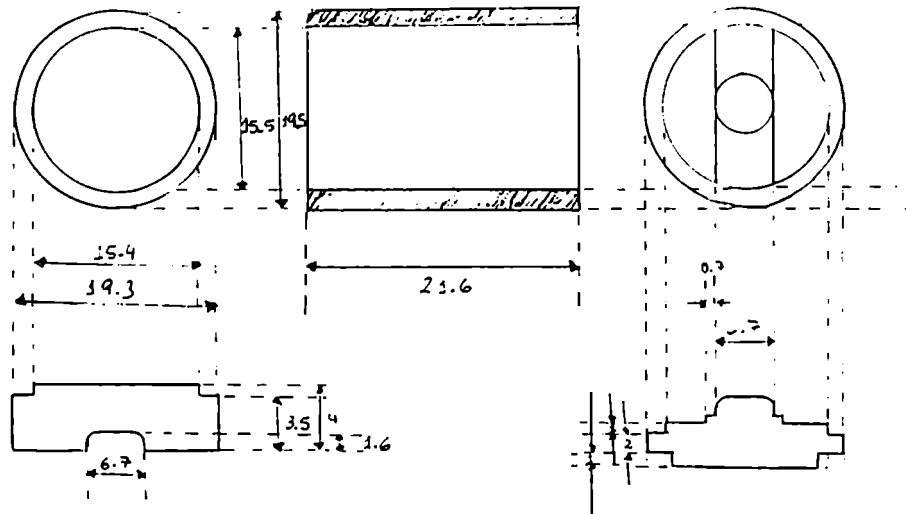


Figura 2.3: Croquis de la celda de carga (las medidas son en mm).

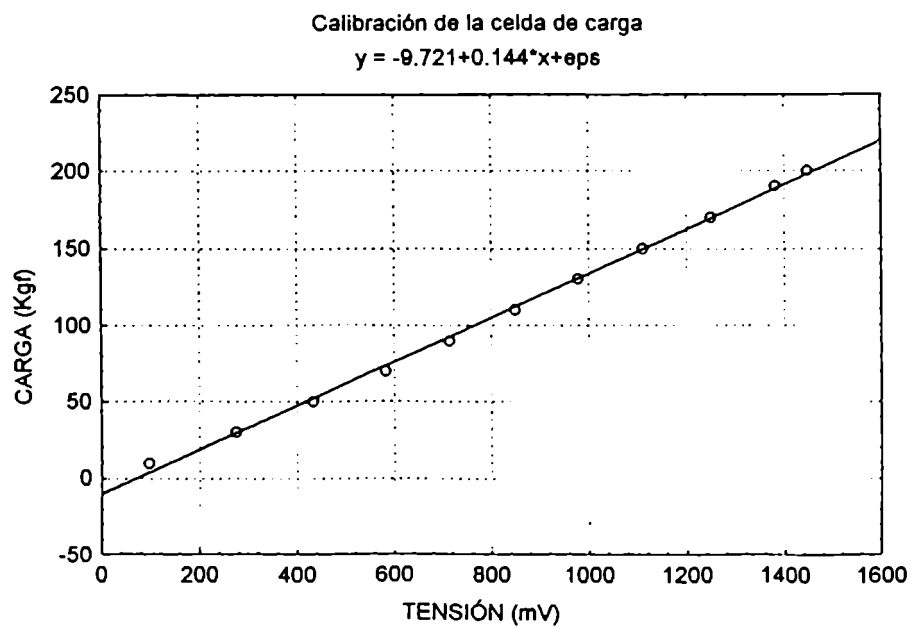


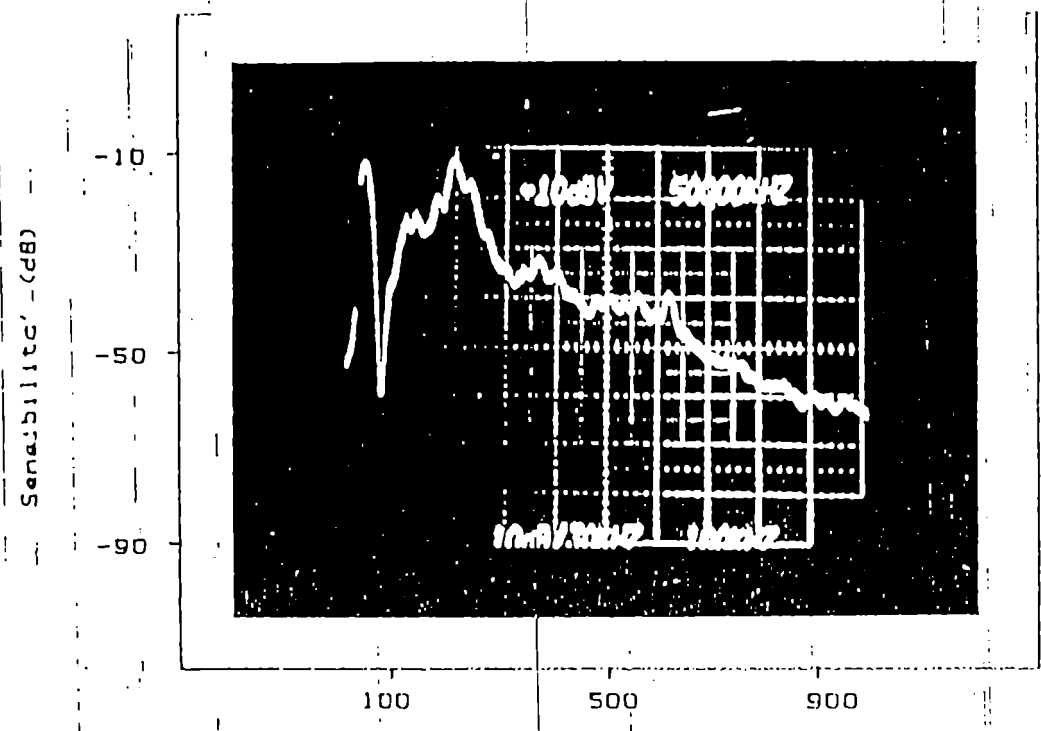
Figura 2.4: Recta de calibración de la celda de carga.



# SENSORE DI EMISSIONE ACUSTICA

Mod. AV-105 Serie 252101

## SCHEDA DI CALIBRAZIONE

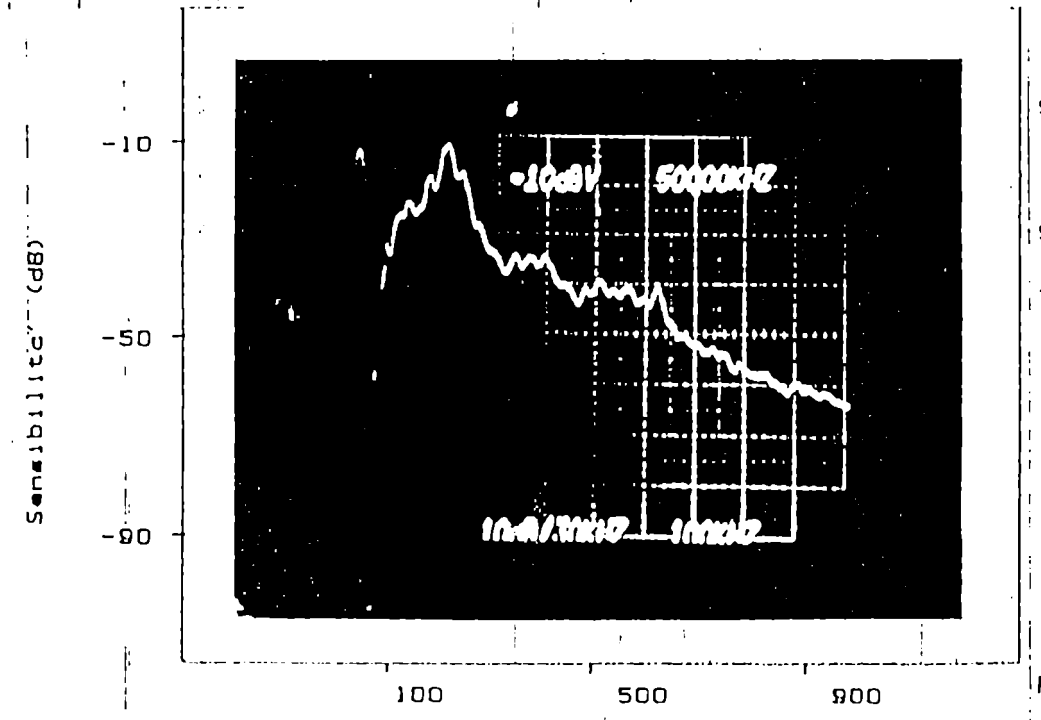


N. SCO-3-00

SENSORE N. 355

Sensibilità di picco  
- 68 dB/rail. 1V/ubar

Frequenza (KHz)



SENSORE N. 358

Sensibilità di picco  
- 68 dB/rail. 1V/ubar

Frequenza (KHz)

Metodo di misura: getto d'aria - Risoluzione 30 KHz  
Preamplificatore: CISE Mod. PA01  
Dati ottenuti per confronto con il sensore AET. FAC-500

Firma Operatore: [Signature]

Data: 7.7.88

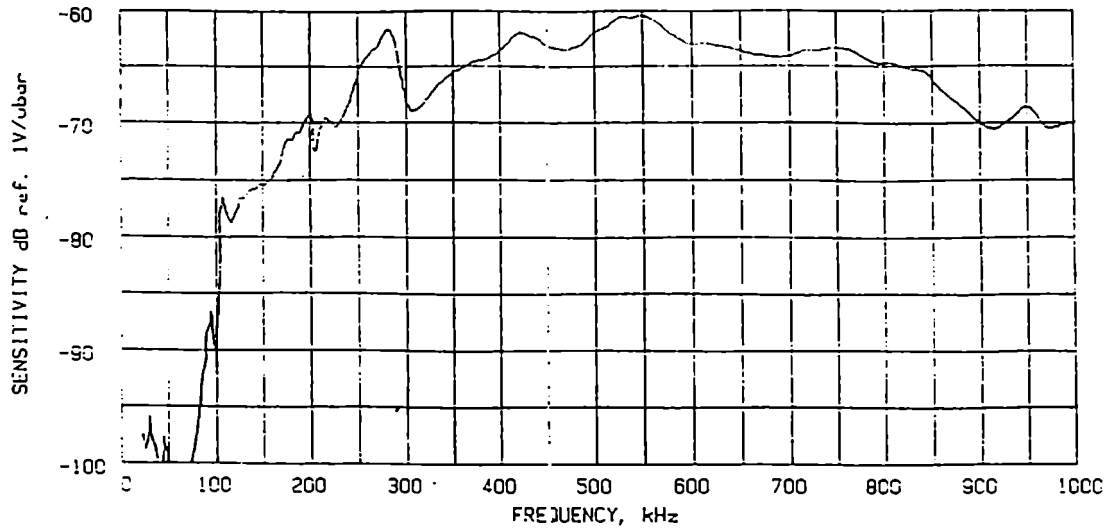
Figura 2.5: Curvas de calibración de los dos sensores resonantes.

MODEL NUMBER: WD

DATE: 03/22/91

SERIAL NUMBER: 942

TESTED BY: CE



PAC certifies that this sensor meets all performance, environmental, and physical standards established in applicable PAC specifications. Calibration methodology based on ASTM standard E975- "Standard Guide for Determining the Reproducibility of Acoustic Emission Sensor Response".

CC-1

Figura 2.6: Curva de calibración del sensor de banda ancha.

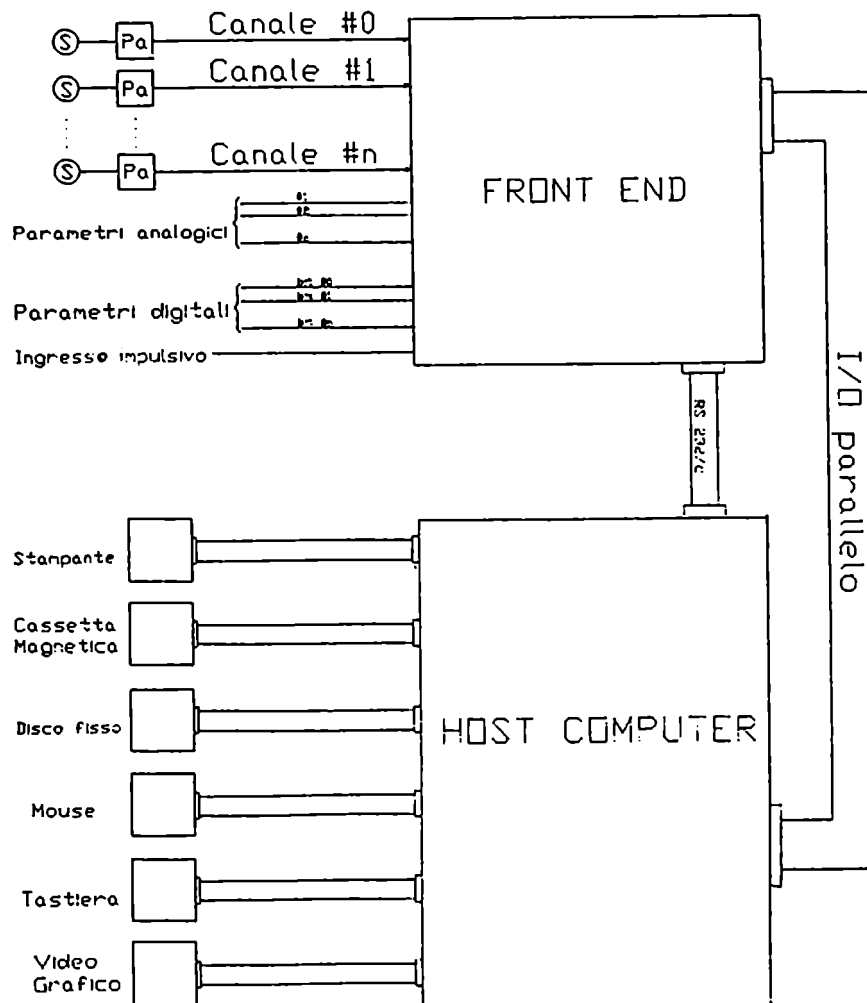
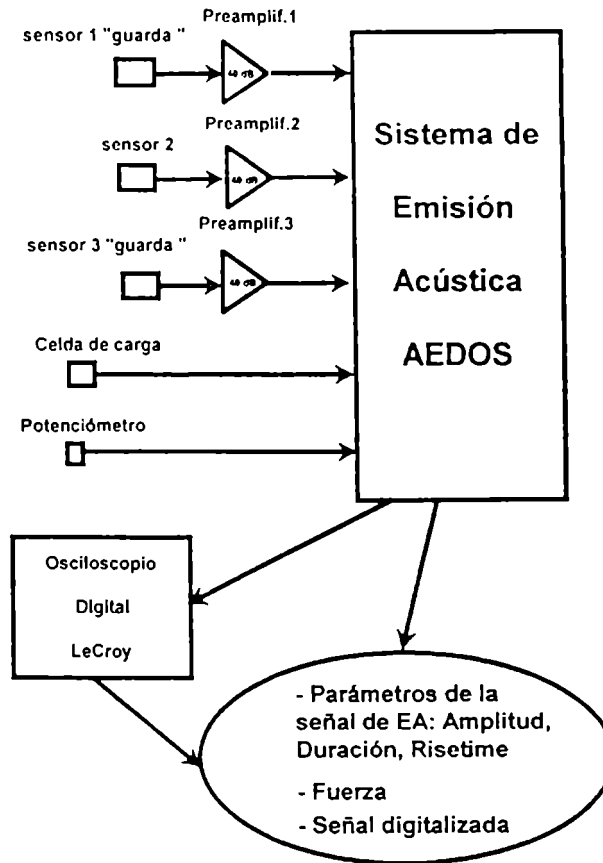


Figura 2.7: Diagrama en bloques del sistema AEDOS (Ref. [2-3]).



**Figura 2.8:** Diagrama en bloques de todo el sistema experimental empleado.

### 3. RESULTADOS EXPERIMENTALES

*En este Capítulo se describen los distintos tipos de ensayos realizados y se muestra la caracterización química, metalográfica y mecánica de las probetas. También se describen los resultados de los ensayos.*

#### 3.1 - Clasificación general de los ensayos

En total se ensayaron 22 probetas, cortadas de dos tubos de acero Ferrítico-Perlítico sin costura, ligeramente distintos (llamados aquí material 1 y material 2), de uso en la industria petrolera y con geometrías similares. Las probetas con el prefijo ARO corresponden a trozos de un mismo tubo del material 1, las que tienen el prefijo CEL, con espesor ligeramente menor, a trozos de un mismo tubo del material 2.

En la tabla 3-1 se indican todos los ensayos realizados en orden cronológico, y sus principales características generales.

Como ya se mencionó anteriormente, a todas las probetas se les eliminó un sector circular de 7 cm de longitud de cuerda, para poder introducir las en el dispositivo construido especialmente para deformarlas. En la figura 3.1, se muestra la forma de los distintos tipos de probetas, siendo sus características dimensionales indicadas en la sección 3.2.

Las probetas  $\phi$  y  $\theta$ , tienen la forma cilíndrica original, y se les eliminó mediante un torneado mecánico la capa de óxido que las recubría en su estado natural.

Las probetas  $\beta$ , tienen una muesca triangular de 45° de ángulo en la parte interna media, y de profundidad del orden de 0.2 veces su espesor, para garantizar suficiente ligamento remanente. El objetivo de este maquinado es aumentar la concentración de tensiones para inducir la propagación de fisuras. También fueron maquinadas para eliminarles la capa de óxido.

Las probetas  $\beta_1$ , tienen la misma forma que las  $\beta$ , pero con su capa de óxido original, por lo tanto tienen espesor ligeramente mayor.

Las probetas  $\alpha$ , tienen un adelgazamiento en la parte interna media, para inducir allí la mayor deformación a ser captada por el sensor de EA. También fueron maquinadas para eliminarles la capa de óxido.

Las probetas  $\alpha_1$ , tienen la misma forma geométrica que las  $\alpha$ , pero conservan su capa de óxido original, por lo tanto tienen espesor ligeramente mayor.

La probeta  $\gamma$ , tiene la misma forma geométrica general que las  $\beta$ , pero se le creó una prefisura en el fondo de la muesca, producida por fatiga en una máquina especial.

Los valores de ganancia del amplificador y del umbral se refieren al canal 2, es decir, al sensor de banda ancha ubicado en la parte superior de la probeta, a 1 cm de distancia de su generatriz media (ver figura 2.2 del Capítulo 2), que registraba la verdadera EA, producida por la deformación, propagación de fisuras, o rotura de la capa de óxido. La distancia de 1 cm garantizaba que el sensor estuviera suficientemente cerca de las fuentes de EA, pero que no sufriera desplazamientos relativos debido a la deformación de la probeta.

Durante la realización de los primeros 8 ensayos, se estuvo diseñando y construyendo la celda de carga, de modo que en éstos (S/celda de carga) no se pudo medir la fuerza realizada.

La máxima abertura de las mordazas fue de 6.5 cm y la carga máxima alcanzada durante los ensayos fue de 50 Kgf.

La cantidad de eventos totales corresponde a la cifra acumulativa final que proporcionaba el sistema de EA. Pero al analizar los eventos uno por uno, había algunos cuya Duración era menor que el Risetime, ya que esto no tiene sentido físico alguno, fueron desechados. Estos valores erróneos, son debidos a la electrónica interna del equipo, o bien a circunstancias de cálculo particulares no debidamente consideradas en el desarrollo del software del equipo. También fueron descartados aquellos eventos en los que la Amplitud era mayor que 10 V, ya que al saturar al sistema, producían valores incorrectos de los parámetros de las señales. La cantidad final de eventos resultantes se indica como "eventos aceptados".

En el ensayo ARO3, la probeta fue abierta y cerrada varias veces, para estudiar las fuentes de EA espúreas (fricción entre el tornillo y la rosca, fricción entre la probeta y las mordazas, etc.), de modo que la cantidad de eventos producidos no se tuvo en cuenta ( se indican con el símbolo \* ).

La palabra "Foto" en la última columna, se refiere a que se presentarán fotos (macrografías y/o micrografías) de las probetas indicadas.

Los 10 primeros ensayos sirvieron para calibrar todo el dispositivo experimental, es decir, el equipo de EA, la celda de carga y el potenciómetro, y determinar así las mejores condiciones de medición.

En este Trabajo de Tesis, para el estudio de la EA sólo se tendrán en cuenta los resultados de los últimos 12 ensayos realizados, desde el CEL8 hasta el CEL20.

*Tabla 3-I: Características de los ensayos realizados.*

N°	Nombre	Material	Tipo	Ganancia (dB)	Umbral (dB)	Eventos totales	Eventos aceptados	Observaciones
1	ARO1	1	$\phi$	30	4	594	103	S/celda de carga
2	ARO2	1	$\phi$	30	4	136	91	S/celda de carga
3	ARO3	1	$\phi$	30	4	*	*	S/celda de carga. Foto
4	CEL1	2	$\theta$	38	14	7	4	S/celda de carga

N°	Nombre	Material	Tipo	Ganancia (dB)	Umbral (dB)	Eventos totales	Eventos aceptados	Observaciones
5	CEL2	2	$\theta$	38	16	17	7	S/celda de carga
6	CEL3	2	$\theta$	40	30	8	4	S/celda de carga
7	CEL4	2	$\theta$	42	20	14	7	S/celda de carga
8	CEL5	2	$\beta$	42	20	16	7	S/celda de carga
9	CEL6	2	$\beta$	46	20	90	33	C/celda de carga
10	CEL7	2	$\beta$	46	20	13	2	C/celda de carga
11	CEL8	2	$\beta$	46	16	35	17	C/celda de carga
12	CEL9	2	$\beta$	50	20	56	35	C/celda de carga
13	CEL10	2	$\beta_1$	50	20	306	214	C/celda de carga
14	CEL11	2	$\beta$	50	22	146	65	C/celda de carga
15	CEL12	2	$\alpha$	50	22	90	27	C/celda de carga
16	CEL13	2	$\alpha$	50	22	83	26	C/celda de carga
17	CEL14	2	$\alpha$	50	22	96	21	C/celda de carga
18	CEL15	2	$\alpha_1$	50	22	166	141	C/celda de carga
19	CEL16	2	$\alpha_1$	50	22	328	242	C/celda de carga
20	CEL17	2	$\alpha_1$	50	22	462	332	C/celda de carga
21	AROF1	1	$\gamma$	50	22	83	64	C/celda de carga. Foto
22	CEL20	2	$\beta$	50	24	193	133	C/celda de carga

### 3.2 - Caracterización geométrica

Las probetas fueron preparadas con distintas formas geométricas, a fin de inducir la generación de distinto tipo de fuentes de EA.

En la figura 3.1, se muestran las formas, y dimensiones de los distintos tipos de probetas.

Para la probeta  $\phi$  (material 1, sin óxido), las dimensiones características son:

$$d_e = 145.0 \text{ mm} \pm 0.1 \text{ mm} \quad (\text{diámetro externo})$$

$e = 9.0 \text{ mm} \pm 0.1 \text{ mm}$  (espesor)

$a = 67.0 \text{ mm} \pm 0.1 \text{ mm}$  (abertura)

Las probetas  $\theta$  (material 2, sin óxido), tienen las siguientes dimensiones:

$d_e = 142.0 \text{ mm} \pm 0.1 \text{ mm}$  (diámetro externo)

$e = 4.5 \text{ mm} \pm 0.1 \text{ mm}$  (espesor)

$a = 70.0 \text{ mm} \pm 0.1 \text{ mm}$  (abertura)

Para las probetas  $\beta$  (material 2, sin óxido, con muesca), las dimensiones son:

$d_e = 142.0 \text{ mm} \pm 0.1 \text{ mm}$  (diámetro externo)

$e = 4.5 \text{ mm} \pm 0.1 \text{ mm}$  (espesor)

$p_m = 2.0 \text{ mm} \pm 0.1 \text{ mm}$  (profundidad de la muesca)

$a = 70.0 \text{ mm} \pm 0.1 \text{ mm}$  (abertura)

En la probeta  $\beta_1$ , (material 2, con muesca, con óxido), se agregó una delgada capa de óxido, quemando la probeta en la zona de la muesca, bajo la llama del gas.

En las probetas  $\alpha$  (material 2, sin óxido, con adelgazamiento), sus dimensiones corresponden a los siguientes valores:

$d_e = 142.0 \text{ mm} \pm 0.1 \text{ mm}$  (diámetro externo)

$e = 4.5 \text{ mm} \pm 0.1 \text{ mm}$  (espesor)

$e_a = 2.5 \text{ mm} \pm 0.1 \text{ mm}$  (espesor en la zona de adelgazamiento)

$l_a = 25.0 \text{ mm} \pm 0.1 \text{ mm}$  (longitud de la zona de adelgazamiento)

$a = 70.0 \text{ mm} \pm 0.1 \text{ mm}$  (abertura)

Las probetas  $\alpha_1$  (material 2, con óxido, con adelgazamiento), tienen dimensiones que corresponden a los siguientes valores:

$d_e = 143.0 \text{ mm} \pm 0.1 \text{ mm}$  (diámetro externo)

$e = 5.2 \text{ mm} \pm 0.1 \text{ mm}$  (espesor)

$e_a = 2.5 \text{ mm} \pm 0.1 \text{ mm}$  (espesor en la zona de adelgazamiento)

$l_a = 25.0 \text{ mm} \pm 0.1 \text{ mm}$  (longitud de la zona de adelgazamiento)

$a = 70.0 \text{ mm} \pm 0.1 \text{ mm}$  (abertura)

Para la probeta  $\gamma$ , (material 1, sin óxido, con muesca, con prefisura), tiene las mismas dimensiones que las probetas  $\phi$ , pero debe agregarse:

$p_m = 2.2 \text{ mm} \pm 0.1 \text{ mm}$  (profundidad de la muesca)

$p_p = 2.6 \text{ mm} \pm 0.1 \text{ mm}$  (profundidad de la prefisura de fatiga)

$a = 67.0 \text{ mm} \pm 0.1 \text{ mm}$  (abertura)

### 3.3 - Caracterización química

Las principales determinaciones y valores obtenidos se indican en la tabla 3-II. El método de análisis fue: Combustión y Espectrometría I. R <sup>[3-1, 3-2]</sup>. Todos los valores de la determinación corresponden a valores de g/100g.

Tabla 3-II. Composición química de las probetas.

Material	C	S	P	Si	Mn	Ti	V	Nb
1	.29±.01	.008±.001	.017±.001	.53±.01	1.43±.01	<.05	.12±.01	<.03
2	.160±.001	.0011±.0003	.042±.002	.26±.01	.67±.02	<.05	<.05	<.03

### 3.4 - Caracterización mecánica

Las probetas de tracción para la caracterización mecánica fueron construidas a partir de sendos trozos de tubos, según Norma IRAM-IAS U500-2608. Los ensayos de tracción, se realizaron con una Máquina de tracción Tinius-Olsen.

Los principales resultados se detallan en la tabla 3-III.

Tal como era previsible, ya que estos tubos fueron fabricados para la industria petrolera, los resultados muestran que están hechos con un acero dúctil.

Tabla 3-III: Características mecánicas de las probetas.

Material	$\sigma$ máxima (Kg/mm <sup>2</sup> )	$\sigma$ ( $\epsilon=0.2\%$ ) (Kg/mm <sup>2</sup> )
1	75	52
2	50	34

### 3.5 - Caracterización metalográfica



Se examinó un corte longitudinal (en la dirección de laminación de los tubos, dirección axial), y otro transversal (perpendicular a la dirección de laminación de los tubos), de los dos materiales, identificándose los microconstituyentes presentes en cada uno. Para la preparación de las muestras se siguió la norma ASTM E-3. Luego del pulido grueso, se terminó de preparar la muestra con un pulido fino con paños de pasta diamantada de 7  $\mu\text{m}$  y 1  $\mu\text{m}$  respectivamente.

Para revelar la microestructura se siguieron las especificaciones de la norma ASTM E-407.

Se determinó la distribución de inclusiones, tipo y forma, según norma ASTM E-45. En cada muestra se midió su tamaño de grano según norma ASTM E-112. Cada material también fue ensayado con una carga de 100 gr microdureza Vickers, según norma ASTM E-384<sup>[3-3]</sup>.

### **3.5.1 - Material 1**

Corte longitudinal: se observa un acero Ferrítico-Perlítico, con un bandeo compacto, con bandas de gran concentración de colonias de Perlita que presentaban principio de esferoidización. El tamaño de grano oscila entre 11  $\mu\text{m}$  y 16  $\mu\text{m}$ . Se detectó una distribución de inclusiones homogénea, con partículas de segunda fase de Sulfuros de Manganeso, con diámetro nominal entre 0.15  $\mu\text{m}$  y 0.30  $\mu\text{m}$ , del orden de 100 veces más chicas que el grano. La figura 3.2 muestra las micrografías obtenidas para dos aumentos distintos.

Corte transversal: se verificaron los datos anteriores, no detectándose anomalías microestructurales. El bandeo y la distribución de Perlita pueden verse en la figura 3.3 para dos aumentos distintos.

Microdureza Vickers: 240.

### **3.5.2 - Material 2**

Corte longitudinal: como en el caso anterior, se determinó la presencia de un acero Ferrítico-Perlítico, bandeo, orientado en el sentido de laminación. En este caso, las colonias de Perlita se encuentran en estado laminar. El tamaño de grano oscila entre un diámetro nominal de 22  $\mu\text{m}$  y 32  $\mu\text{m}$ , aproximadamente el doble del material 1. Igual que en el material anterior, se detectó una distribución de inclusiones homogénea, con partículas de segunda fase de Sulfuros de Manganeso, con diámetro nominal entre 0.15  $\mu\text{m}$  y 0.30  $\mu\text{m}$ , 100 veces más chicas que el grano. La figura 3.4 muestra las micrografías obtenidas.

Corte transversal: se verificaron los datos anteriores, no detectándose anomalías microestructurales. La figura 3.5 muestra las micrografías obtenidas.

Microdureza Vickers: 160. Como se deduce de la comparación de los valores de microdureza, este material es ligeramente más blando que el anterior.

### **3.6 - Resultado de los ensayos**

Para poder observar indicios de la deformación soportada por la probeta, antes de ser ensayada, la ARO3 fue desbastada en toda su zona superior, hasta con papel 600. Luego del ensayo, todo a lo ancho de la probeta, en la parte superior más deformada, se pudo apreciar claramente una serie de líneas paralelas entre sí, en la dirección axial del tubo, que correspondían a la formación de bandas de Lüders, producidas por agrupación de dislocaciones. Estas bandas también fueron perfectamente visibles en el espesor de la probeta. En la figura 3.6 se puede apreciar una macrografía, tomada en un banco metalográfico, donde en la zona del espesor de la probeta, se ven claramente las bandas de Lüders, con distinta orientación en la parte superior sometida a compresión y en la parte inferior sometida a tracción. Estas bandas son el resultado de la deformación inhomogénea producida.

Como ya fue indicado anteriormente, se realizaron un total de 22 ensayos. Los 10 primeros sirvieron fundamentalmente para poner a punto todo el sistema experimental. Por lo tanto, sólo se presentarán y analizarán los resultados de los ensayos números 11 al 22 (tipos:  $\beta$ ,  $\beta_1$ ,  $\alpha$ ,  $\alpha_1$ ,  $\gamma$ ).

En las secciones siguientes, para cada ensayo, se indica el nombre, tipo de probeta y material, y se presentan los gráficos obtenidos con el sistema de EA AEDOS. En el caso de estos gráficos, se consideran todos los eventos identificados por el sistema, no sólo los "aceptados". En el Capítulo 4, donde se hace el estudio estadístico de los parámetros de las señales de EA, sólo serán considerados los eventos "aceptados".

Debe aclararse que las oscilaciones en la representación gráfica de la fuerza se deben a ruido eléctrico.

#### **3.6.1 - Ensayo 11**

Nombre: CEL8

Tipo de probeta:  $\beta$  (con muesca, sin óxido)

Material: 2

La figura 3.7 muestra los siguientes gráficos: (a) evolución temporal de la fuerza (trazo más grueso) y la cantidad acumulada de eventos, (b) velocidad de eventos en

función del tiempo, (c) eventos en función de la fuerza, (d) eventos en función de la energía, (e) histograma de Amplitud, (f) histograma de Duración y (g) histograma de Risetime.

En los ensayos  $\beta$ , debido a la presencia de la muesca, y en los  $\alpha$  debido al adelgazamiento, la cantidad de volumen de material involucrado en el proceso de deformación, es la menor de todos los ensayos, (exceptuando el ensayo  $\gamma$ ), ésta es una de las causas de la menor cantidad de eventos de EA obtenidos en estos casos.

Como se ve en la figura (a), durante un tramo del ensayo alrededor del primer minuto, a pesar de aumentar la fuerza, no se registraron eventos de EA. Puede aducirse que debido al efecto Kaiser, no se produce EA hasta que se superen las tensiones previas alcanzadas por el material.

La velocidad de producción de eventos, derivada de la curva acumulada de eventos, casi no varía. Debe recordarse que la velocidad de producción de eventos está ligada con la velocidad de deformación, que se trató de mantener constante en todos los ensayos, logrando una velocidad de abertura de las mordazas del orden de 1.3 cm/min.

### 3.6.2 - Ensayo 12

Nombre: CEL9

Tipo de probeta:  $\beta$  (con muesca, sin óxido)

Material: 2

La figura 3.8 muestra los gráficos correspondientes.

Al igual que en el caso anterior hay un período de aproximadamente 1 minuto donde, a pesar de aumentar la fuerza, no hay aumento de los eventos. La velocidad de producción de eventos es casi constante.

Después del ensayo, se cortó un trozo de la probeta con la muesca, para poder verla en el microscopio electrónico de barrido (MEB). En la micrografía de la figura 3.9, con distintos aumentos, se puede ver la misma zona del fondo de la muesca. En la micrografía (a) con un aumento de 50X, se ve en la zona del centro, el fondo de la muesca, y a ambos lados la zona mecanizada, en la parte (b) con un aumento de 200X, se ve la misma zona del fondo de la muesca, allí ya se pueden distinguir pequeñas microfisuras que se ven más claramente en la micrografía (c) con un aumento de 750X. De estas micrografías queda claro que al deformar la probeta con muesca se produjeron pequeñas microfisuras en el material.

### 3.6.3 - Ensayo 13

Nombre: CEL10

Tipo de probeta:  $\beta_1$  (con muesca, con óxido)

Material: 2

La figura 3.10 muestra los gráficos correspondientes.

Durante los primeros instantes del ensayo a pesar de aumentar la fuerza casi no se produjeron eventos (ver figura (c)). Se observa luego una mucho mayor cantidad de eventos de EA que en los dos ensayos anteriores, esto es debido a la presencia de la rotura de la capa de óxido. La velocidad de producción de eventos es prácticamente constante.

#### **3.6.4 - Ensayo 14**

Nombre: CEL11

Tipo de probeta:  $\beta$  (con muesca, sin óxido)

Material: 2

La figura 3.11 muestra los gráficos correspondientes.

La velocidad de producción de eventos es casi constante. La celda de carga no registró la primera parte del aumento de la fuerza debido a un desperfecto en el sistema de alimentación.

#### **3.6.5 - Ensayo 15**

Nombre: CEL12.

Tipo de probeta:  $\alpha$  (con adelgazamiento, sin óxido)

Material: 2

La figura 3.12 muestra los gráficos correspondientes.

#### **3.6.6 - Ensayo 16**

Nombre: CEL13

Tipo de probeta:  $\alpha$  (con adelgazamiento, sin óxido)

Material: 2

La figura 3.13 muestra los gráficos correspondientes.

Debido a un problema en las conexiones la celda de carga no registró la fuerza correctamente.

### **3.6.7 - Ensayo 17**

Nombre: CEL14

Tipo de probeta:  $\alpha$  (con adelgazamiento, sin óxido)

Material: 2

La figura 3.14 muestra los gráficos correspondientes.

La celda de carga no registró la fuerza correctamente.

### **3.6.8 - Ensayo 18**

Nombre: CEL15

Tipo de probeta:  $\alpha_1$  (con adelgazamiento, con óxido)

Material: 2

La figura 3.15 muestra los gráficos correspondientes.

En éste y los dos ensayos siguientes, el número de eventos es muy similar y grande, debido a la rotura de la capa de óxido. De igual manera la velocidad de producción de eventos es similar y se mantiene constante. Después de la relajación de tensiones debido a la deformación de la zona con adelgazamiento, igual se produjeron eventos.

### **3.6.9 - Ensayo 19**

Nombre: CEL16

Tipo de probeta:  $\alpha_1$  (con adelgazamiento, con óxido)

Material: 2

La figura 3.16 muestra los gráficos correspondientes.

En los gráficos (a) y (b) se puede ver que al comienzo del ensayo la velocidad de producción de eventos es en promedio mayor.

### 3.6.10 - Ensayo 20

Nombre: CEL17

Tipo de probeta:  $\alpha_1$  (con adelgazamiento, con óxido)

Material: 2

La figura 3.17 muestra los gráficos correspondientes.

Al principio de este ensayo, se produjo una falla en el sistema de la celda de carga que impidió el registro de la fuerza.

### 3.6.11 - Ensayo 21

Nombre: AROF1

Tipo de probeta:  $\gamma$  (con muesca, con prefisura)

Material: 1

La figura 3.18 muestra los gráficos correspondientes.

En este ensayo, como se puede apreciar en el registro de la fuerza, se produjo gran inestabilidad de la celda de carga, no obstante, sí se ve claramente cómo después de la propagación de la fisura se produce la relajación de tensiones, cayendo la fuerza a cero.

En este ensayo y en el siguiente, se pudo registrar el parámetro de la abertura de las mordazas, allí se puede ver que las curvas de eventos acumulados y abertura en función del tiempo son muy similares entre sí, pero con distinta pendiente, también se puede ver que la velocidad de abertura es prácticamente constante.

Luego de finalizado el ensayo, la probeta fue quebrada en la zona de la propagación de la fisura. Para ello se la puso en contacto con hielo seco, disminuyendo su temperatura para producir una rotura frágil, que pudiera ser distinguida de la propagación dúctil durante el ensayo. Luego, mediante un proceso de exposición al fuego de la zona de fractura, la superficie tomó un color azulado diferente, dependiendo del tipo de proceso que generó cada parte de la superficie de fractura. Así se pudieron distinguir claramente las distintas zonas presentes: zona de mecanizado de la muesca, superficie de la fisura propagada por fatiga, superficie de avance dúctil de la fisura y rotura frágil final. La identificación de estas zonas permitió evaluar la profundidad de avance de la fisura durante el ensayo. El valor medio del avance de la fisura durante el ensayo fue de  $2.69 \text{ mm} \pm 0.01 \text{ mm}$ .

Estas superficies de fractura fueron luego observadas bajo el microscopio electrónico de barrido (MEB). En la micrografía con 12 aumentos de la figura 3.19 (a) se pueden ver tres zonas de diferente textura: mecanizado de la muesca (zona superior), propagación de la prefisura de fatiga (zona intermedia) y propagación de la prefisura durante el ensayo (zona inferior). En la micrografía con 800 aumentos de la figura 3.19 (b) se puede ver la zona de la prefisura. En la micrografía con 800 aumentos de la figura 3.19 (c) se puede ver la zona de propagación de la prefisura, se pueden apreciar claramente los hoyuelos ("dimples") característicos de una

propagación dúctil, estos hoyuelos son los huecos dejados por una partícula dura (algún carburo o inclusión metálica). En la micrografía con 800 aumentos de la figura 3.19 (d) se puede ver la zona de rotura final, con la superficie más típica de una rotura frágil. El mismo aumento con que fueron tomadas las tres últimas micrografías permite poder comparar y distinguir las características diferentes de cada tipo de avance de la fisura.

### **3.6.12 - Ensayo 22**

Nombre: CEL20

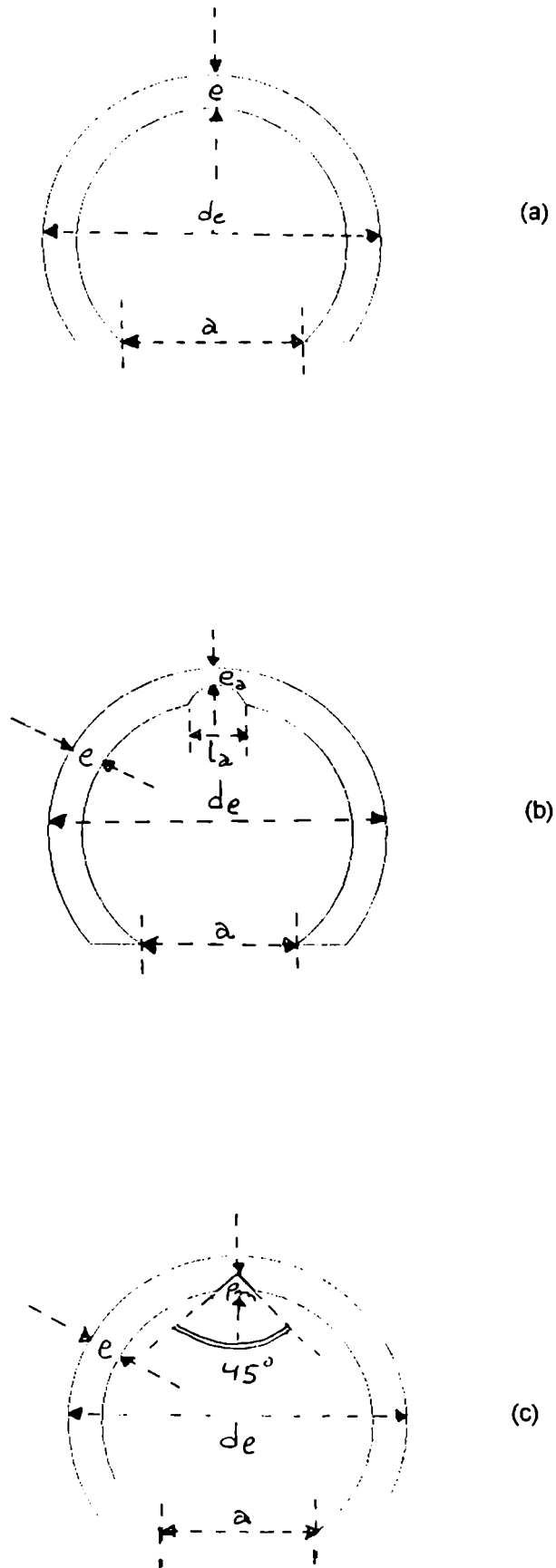
Tipo de probeta:  $\beta$  (con muesca, sin óxido)

Material: 2

La figura 3.20 muestra los gráficos correspondientes.

Probablemente debido a una mejora en el conexionado de los cables se registraron más eventos que en los otros ensayos del mismo tipo.

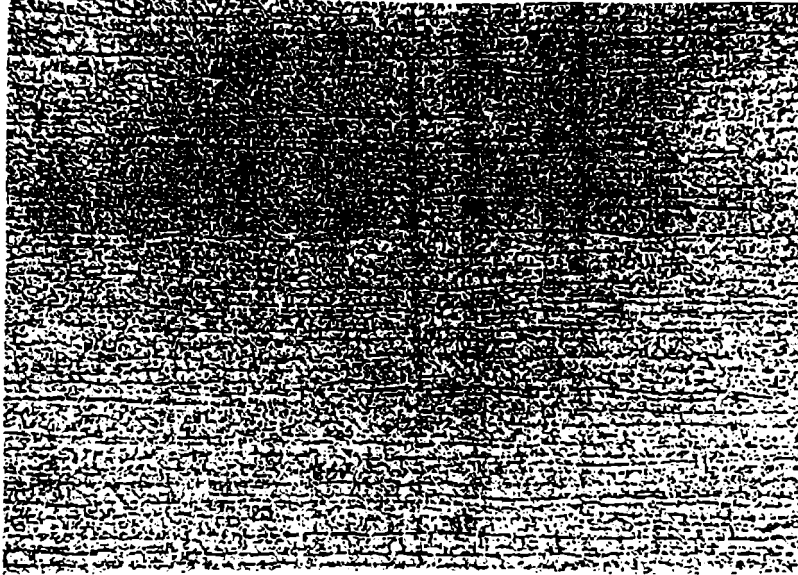
En el registro de la fuerza en función del tiempo, se produjeron discontinuidades debido a un mal funcionamiento del sistema de alimentación de la celda de carga.



**Figura 3.1:** Características geométricas de las probetas: (a) tipos  $\phi$ ,  $\theta$ ; (b) tipos  $\alpha$ ,  $\alpha_1$ ; (c) tipos  $\beta$ ,  $\beta_1$ ,  $\gamma$ .



**Figura 3.2:** Material 1, corte longitudinal, bandeado a diferentes aumentos, (a) 100X, (b) 500X (Ref. [3-3]).

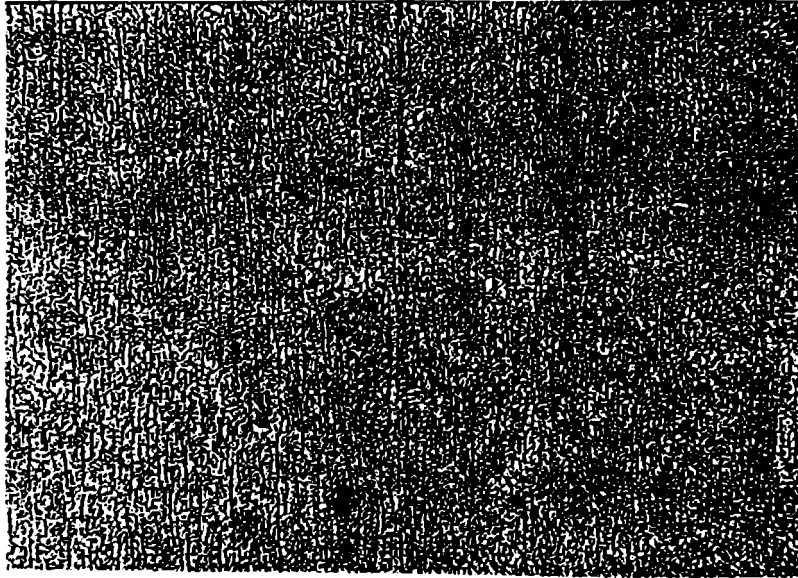


(a)



(b)

**Figura 3.3:** Material 1, corte transversal, bandeado a diferentes aumentos, (a) 100X, (b) 500X (Ref. [3-3]).

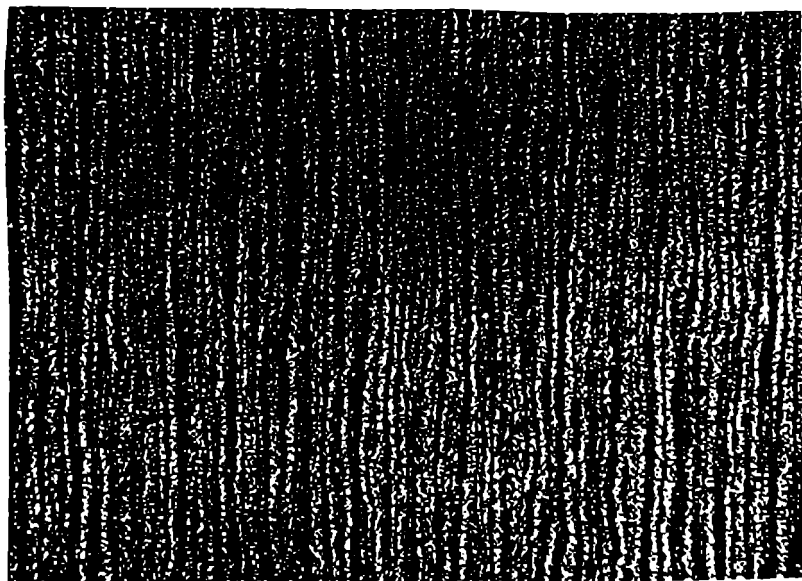


(a)

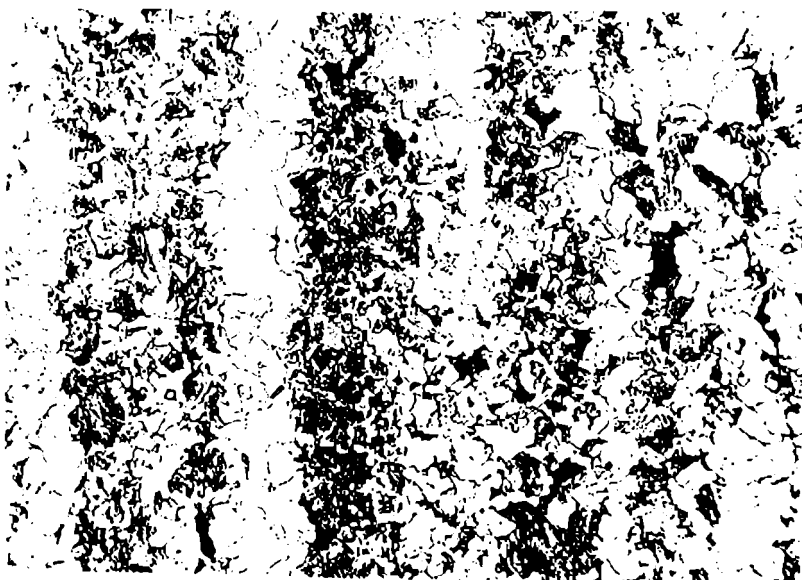


(b)

**Figura 3.4:** Material 2, corte longitudinal, bandeado a diferentes aumentos, (a) 100X, (b) 500X (Ref. [3-3]).

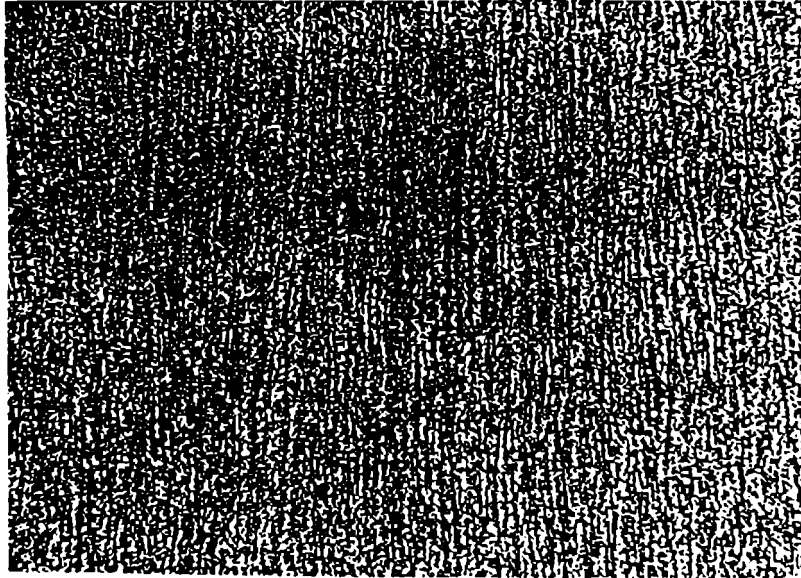


(a)

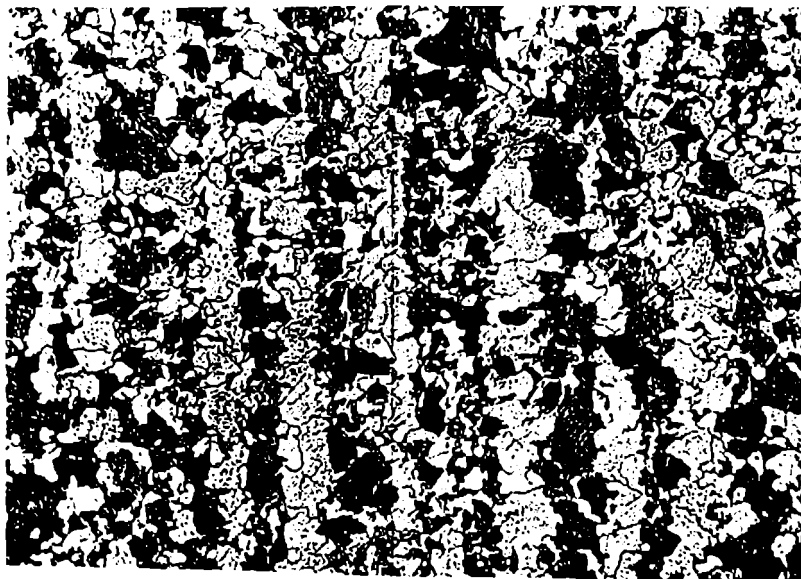


(b)

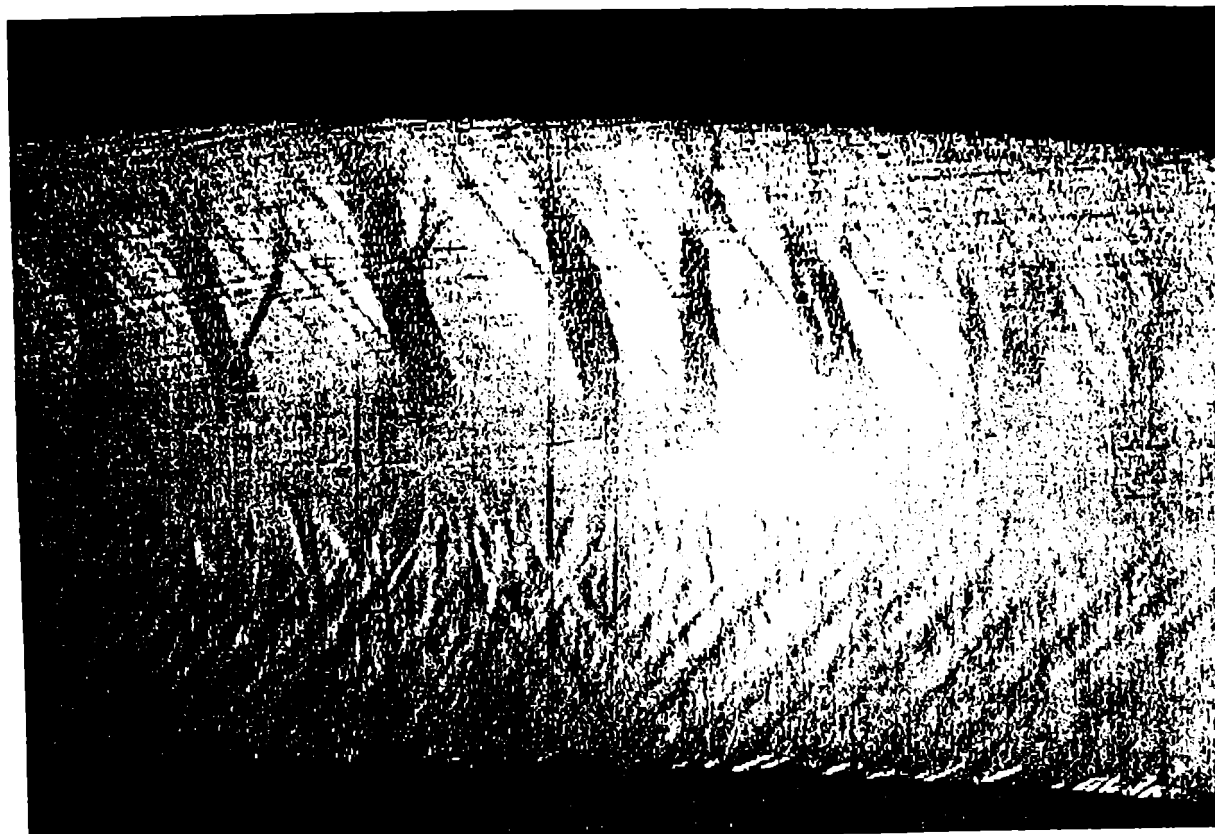
**Figura 3.5:** Material 2, corte transversal, bandeado a diferentes aumentos, (a) 100X, (b) 500X (Ref. [3-3]).



(a)

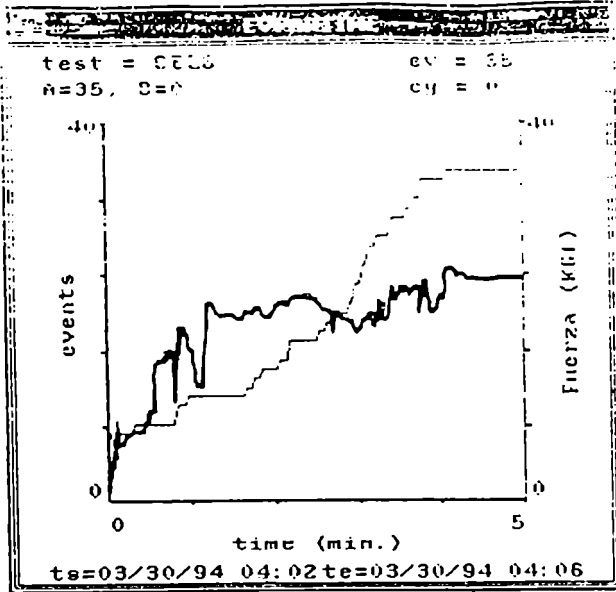


(b)

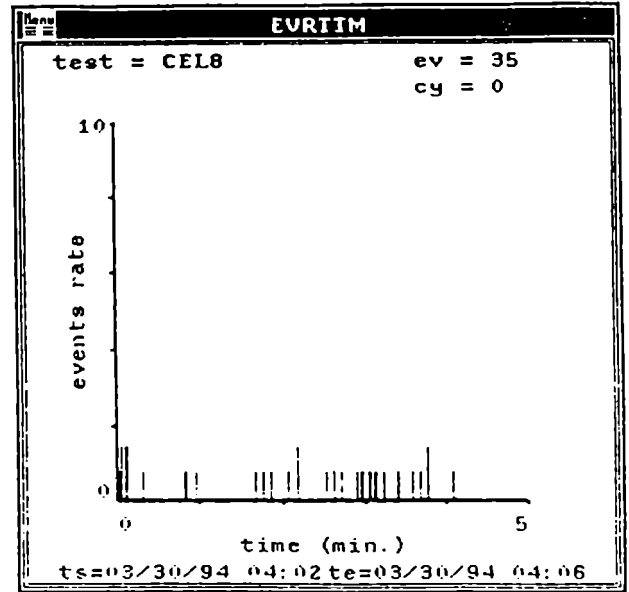


**Figura 3.6:** Probeta ARO3, macrografía obtenida en banco metalográfico, aumento 4.5 x, ampliada 2.2 veces (S. Zalcmán, Comisión Nacional de Energía Atómica).

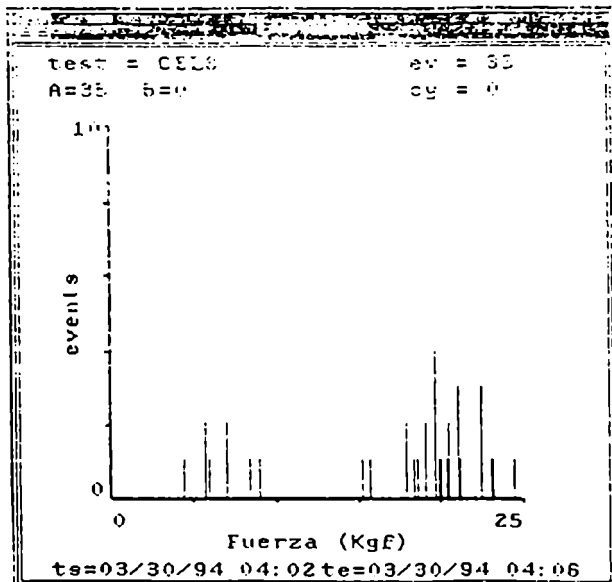
Figura 3.7: CEL8, (a) fuerza y eventos acumulados en función del tiempo, (b) velocidad de eventos en función del tiempo, (c) eventos en función de la fuerza, (d) eventos en función de la energía, (e) histograma de Amplitud, (f) histograma de Duración, (g) histograma de Risetime.



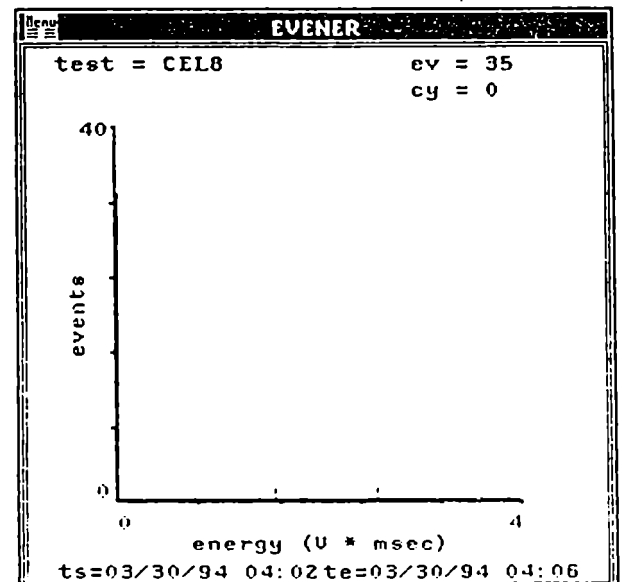
(a)



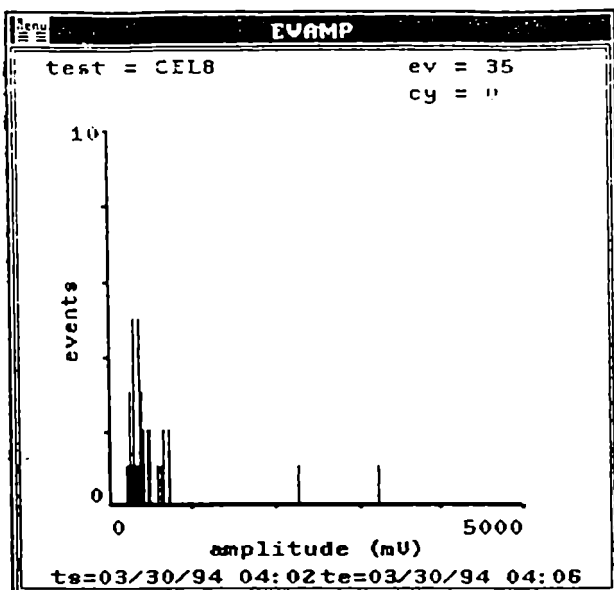
(b)



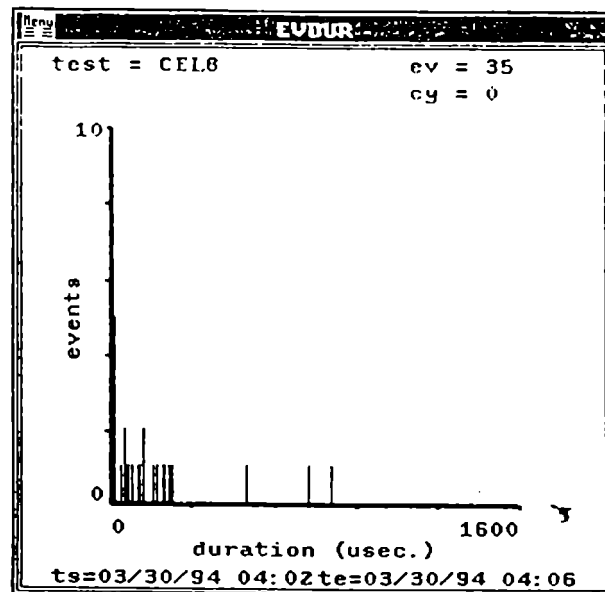
(c)



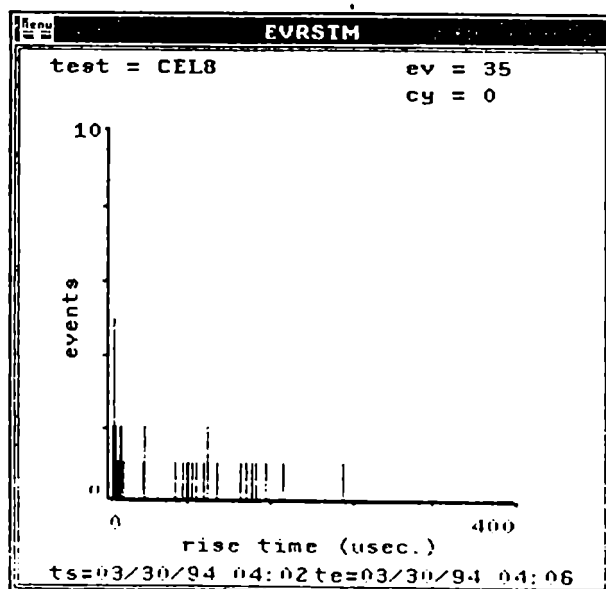
(d)



(e)

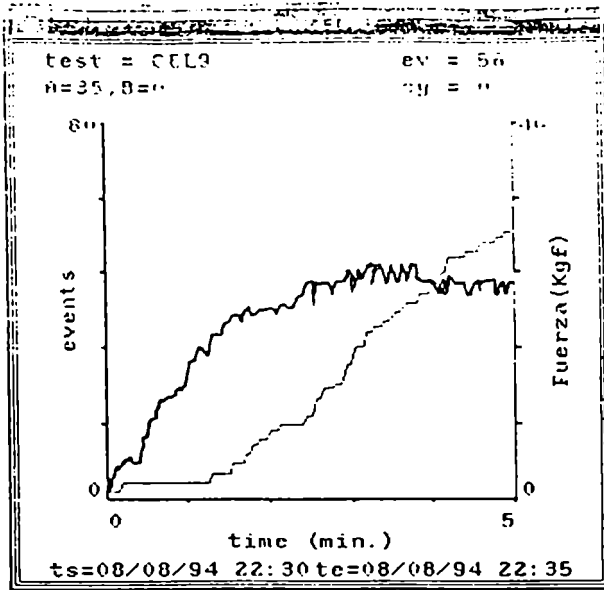


(f)

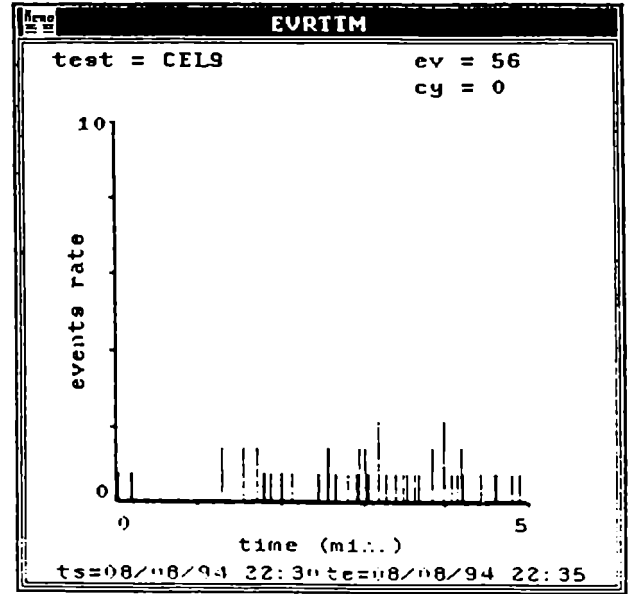


(g)

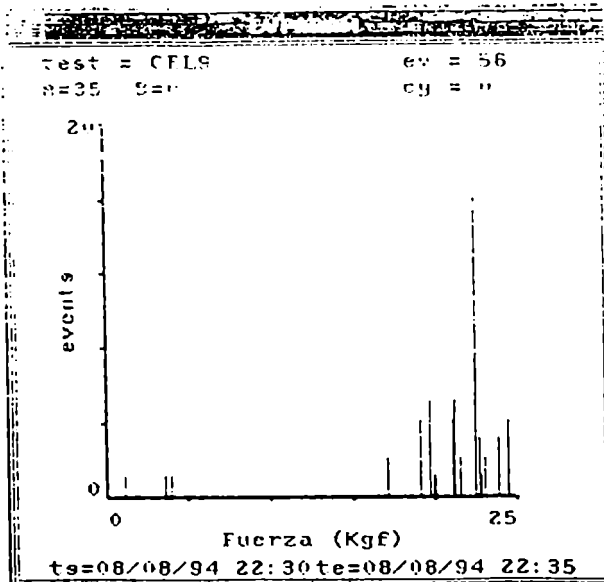
**Figura 3.8:** CEL9, (a) fuerza y eventos acumulados en función del tiempo, (b) velocidad de eventos en función del tiempo, (c) eventos en función de la fuerza, (d) eventos en función de la energía, (e) histograma de Amplitud, (f) histograma de Duración, (g) histograma de Risetime.



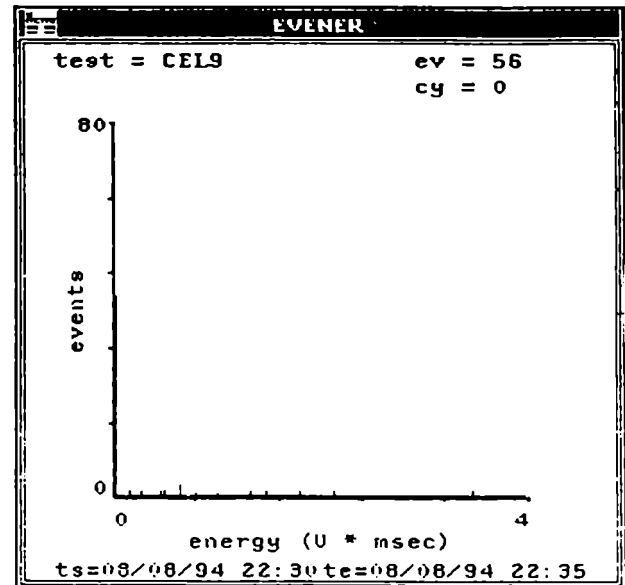
(a)



(b)



(c)



(d)



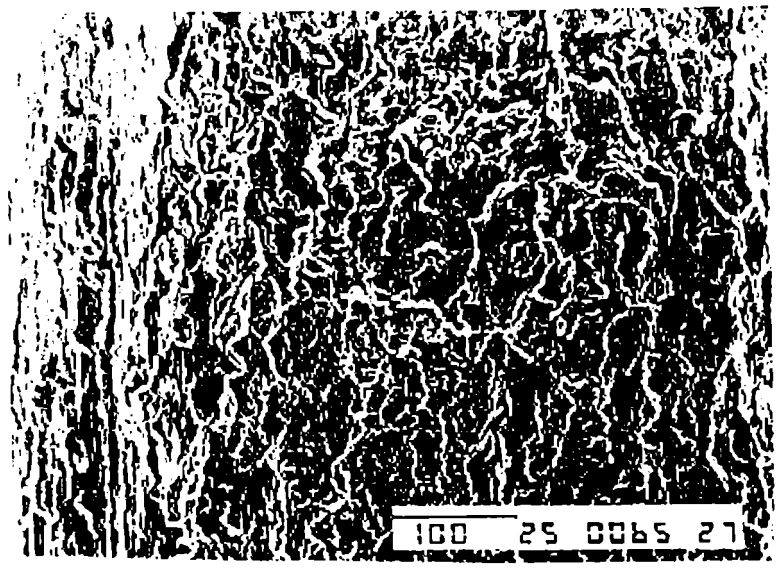


Figura 3.9: Probeta CEL9, micrografías del fondo de la muesca, (a) aumento 50 x, (b) aumento 200 x, (c) aumento 750x (MEB, Comisión Nacional de Energía Atómica).

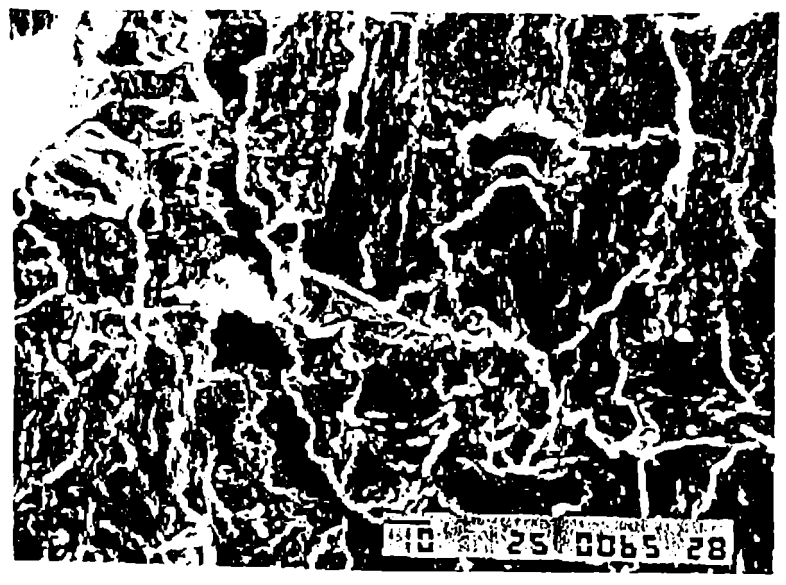
(a)



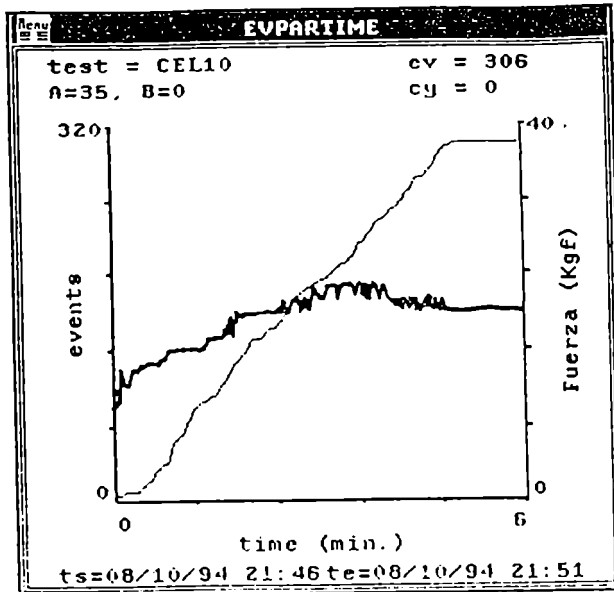
(b)



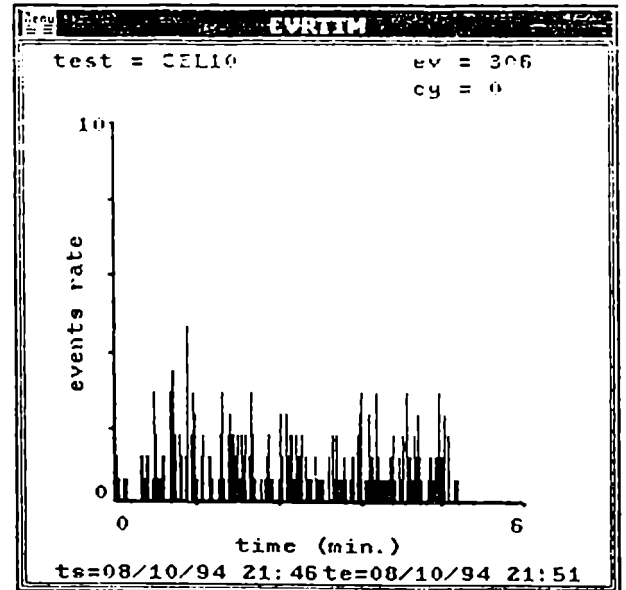
(c)



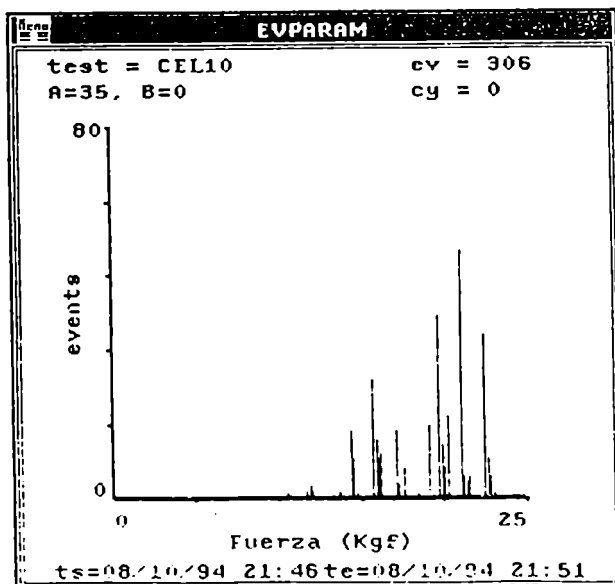
**Figura 3.10:** CEL10, (a) fuerza y eventos acumulados en función del tiempo, (b) velocidad de eventos en función del tiempo, (c) eventos en función de la fuerza, (d) eventos en función de la energía, (e) histograma de Amplitud, (f) histograma de Duración, (g) histograma de Risetime.



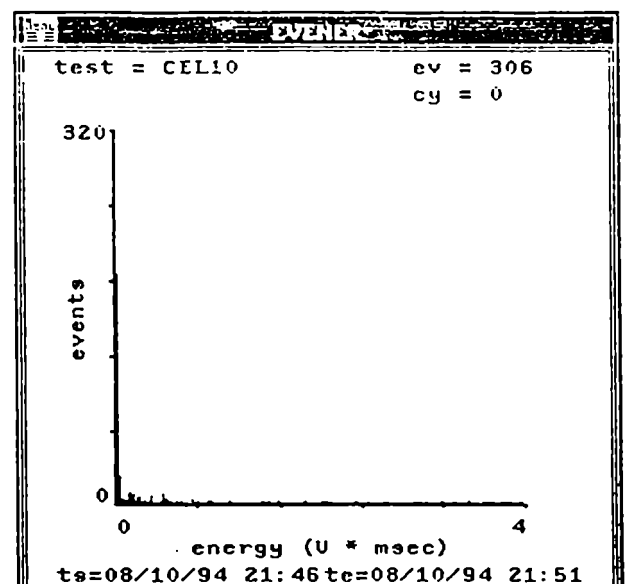
(a)



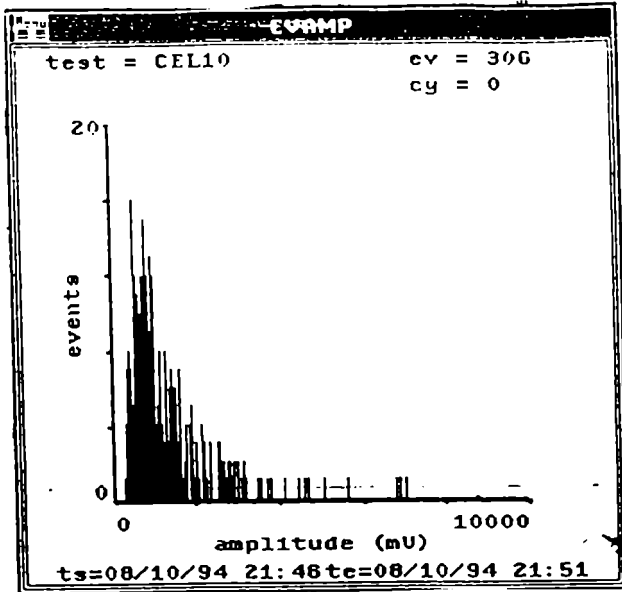
(b)



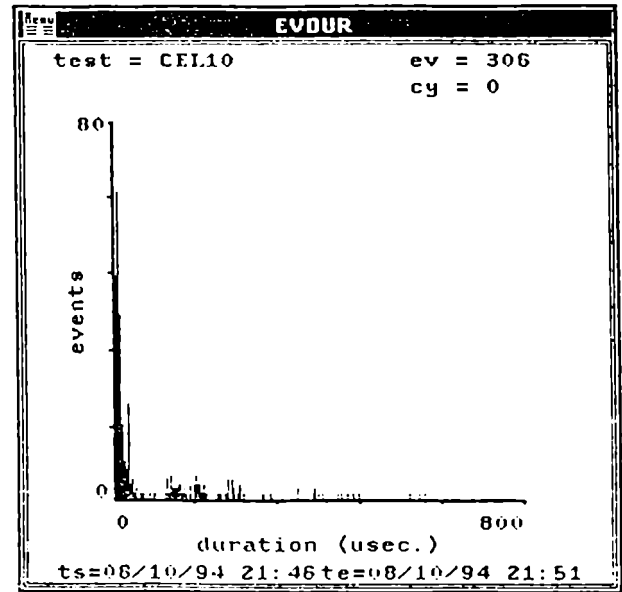
(c)



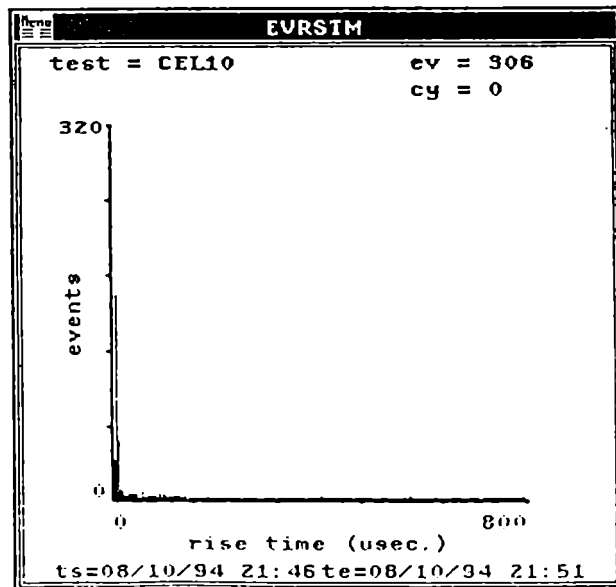
(d)



(e)

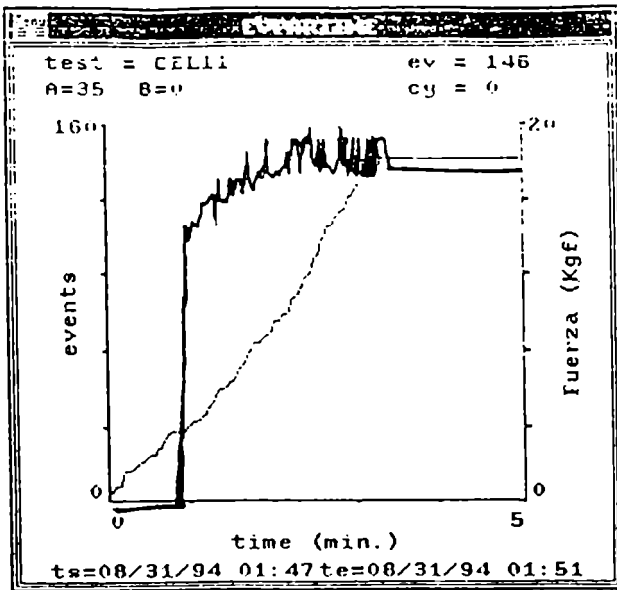


(f)

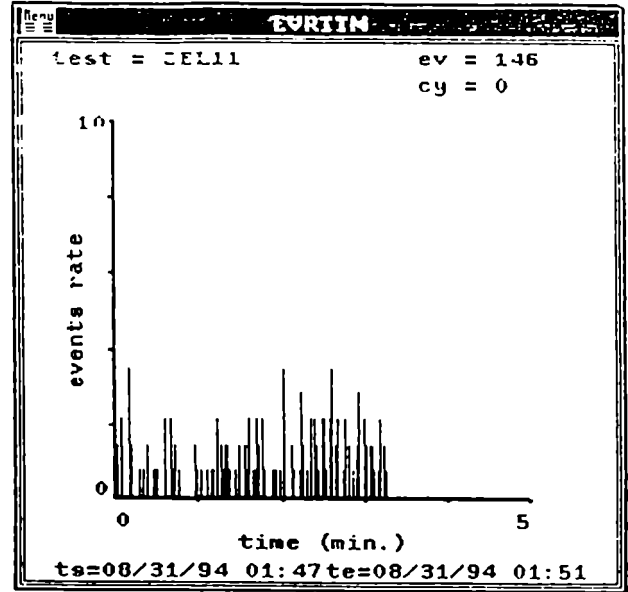


(g)

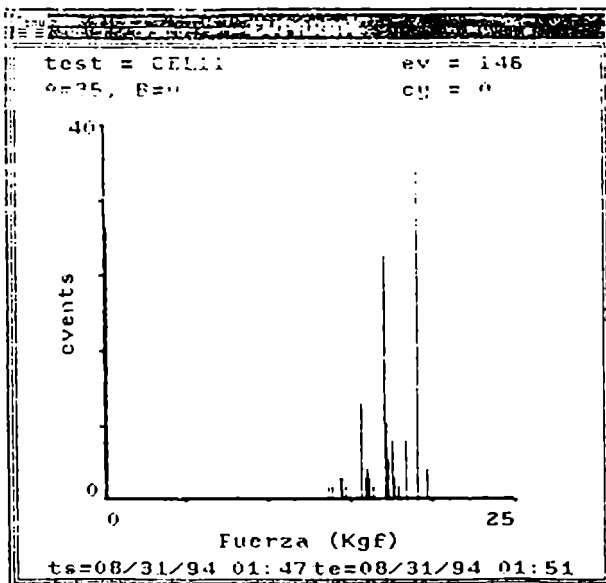
Figura 3.11: CEL11, (a) fuerza y eventos acumulados en función del tiempo, (b) velocidad de eventos en función del tiempo, (c) eventos en función de la fuerza, (d) eventos en función de la energía, (e) histograma de Amplitud, (f) histograma de Duración, (g) histograma de Risetime.



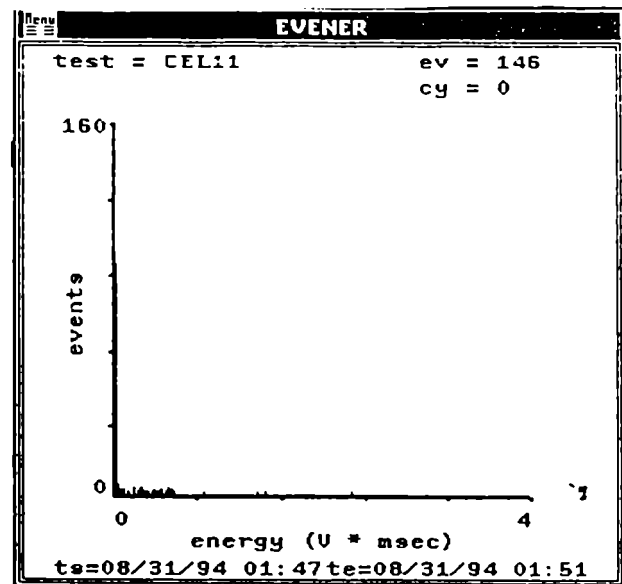
(a)



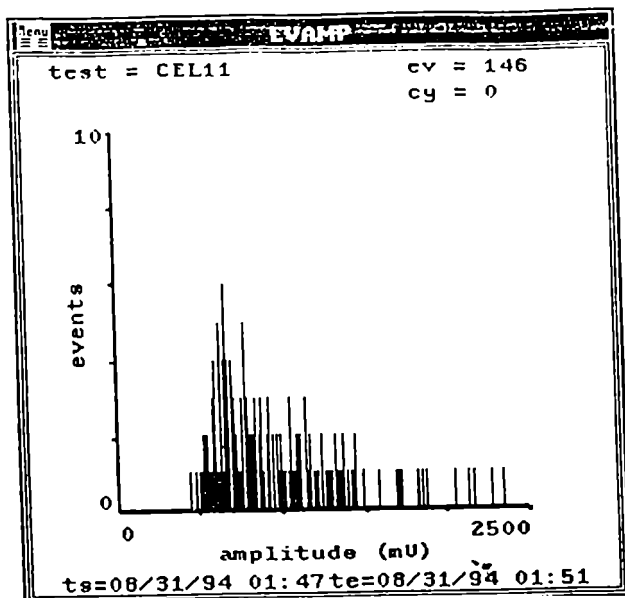
(b)



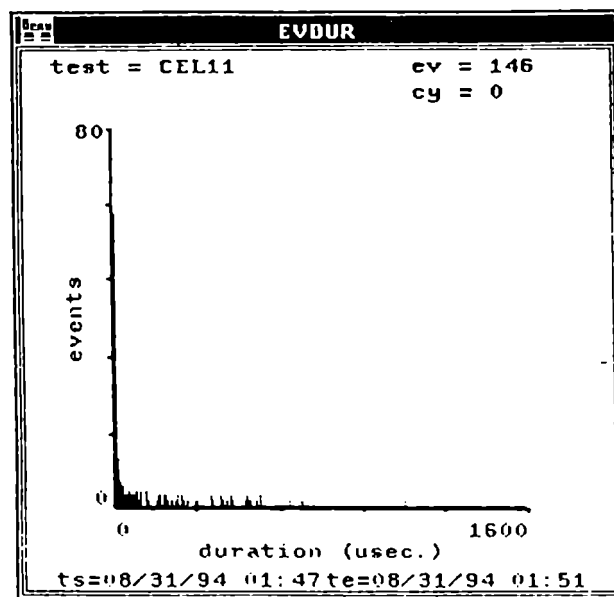
(c)



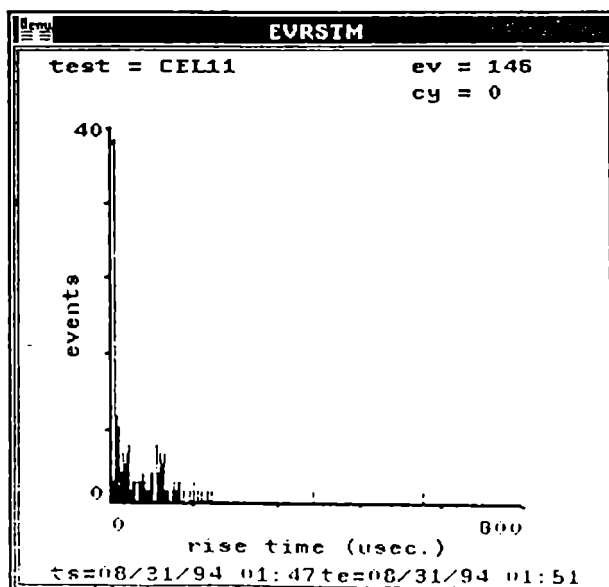
(d)



(e)

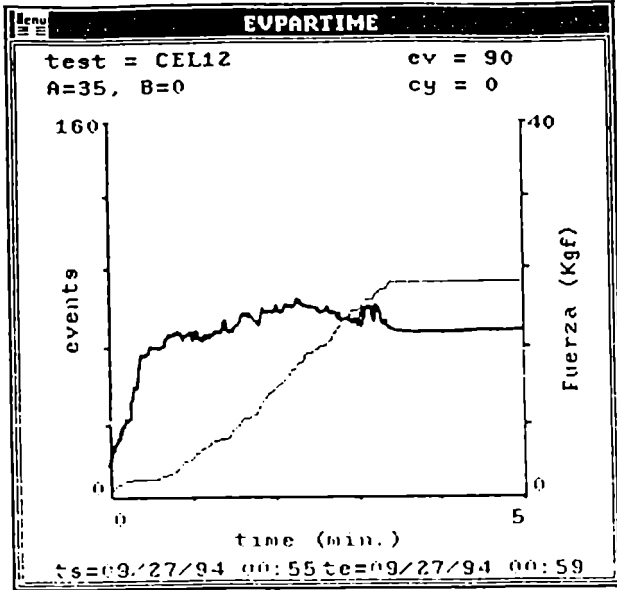


(f)

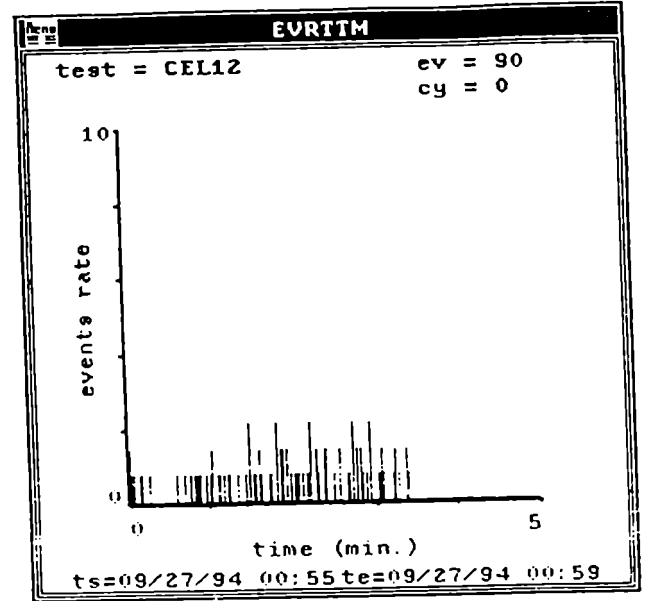


(g)

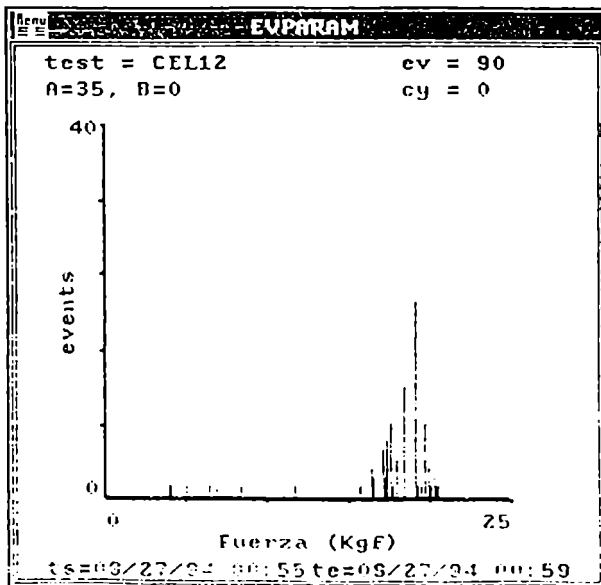
Figura 3.12: CEL12, (a) fuerza y eventos acumulados en función del tiempo, (b) velocidad de eventos en función del tiempo, (c) eventos en función de la fuerza, (d) eventos en función de la energía, (e) histograma de Amplitud, (f) histograma de Duración, (g) histograma de Risetime.



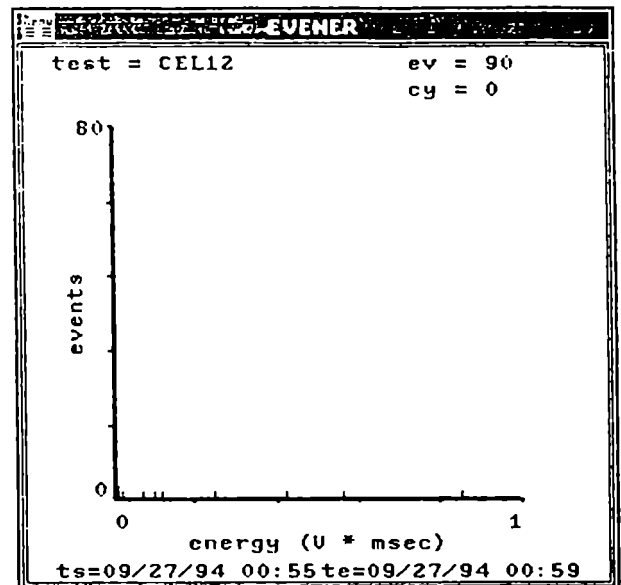
(a)



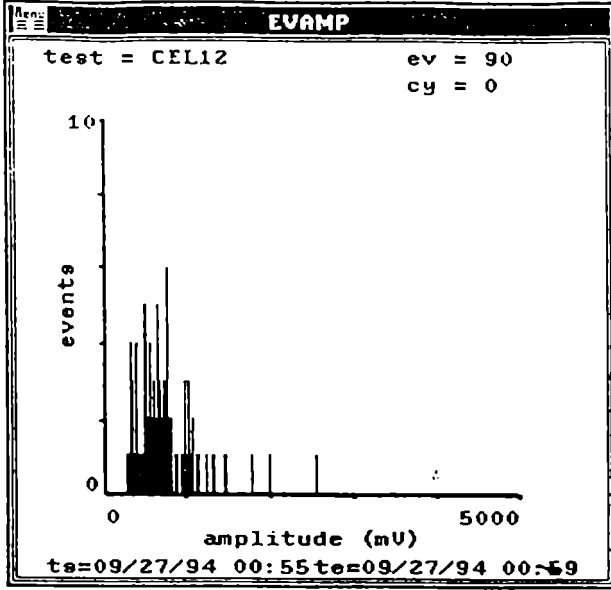
(b)



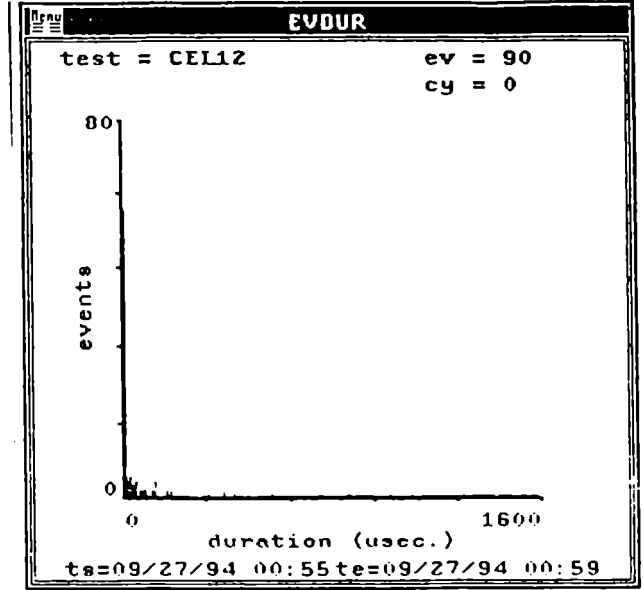
(c)



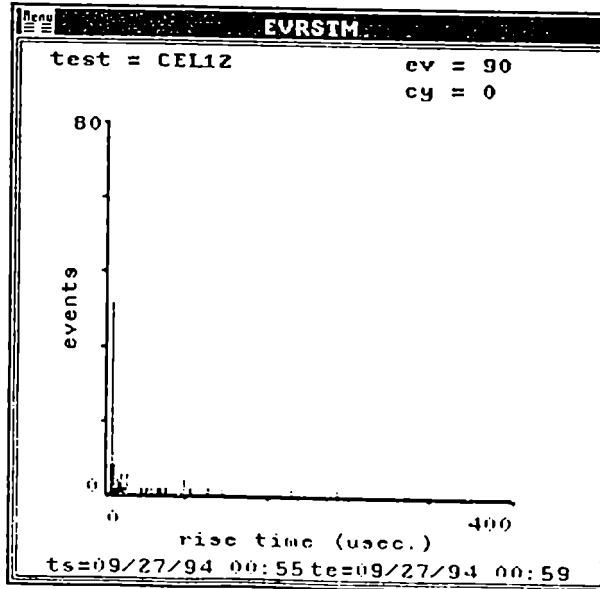
(d)



(e)



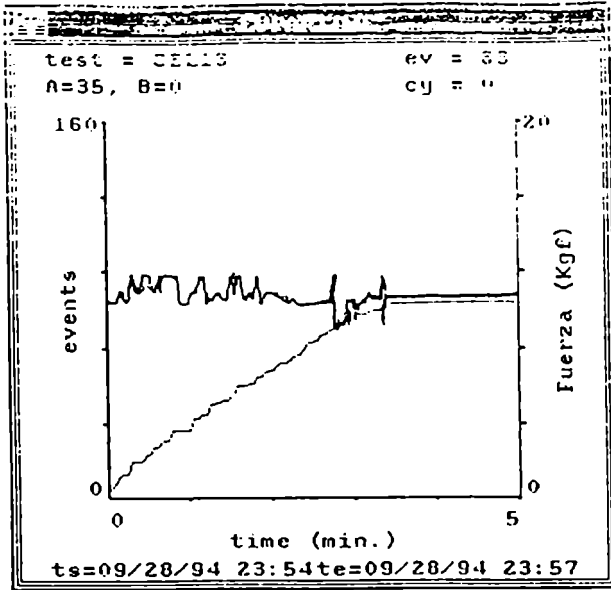
(f)



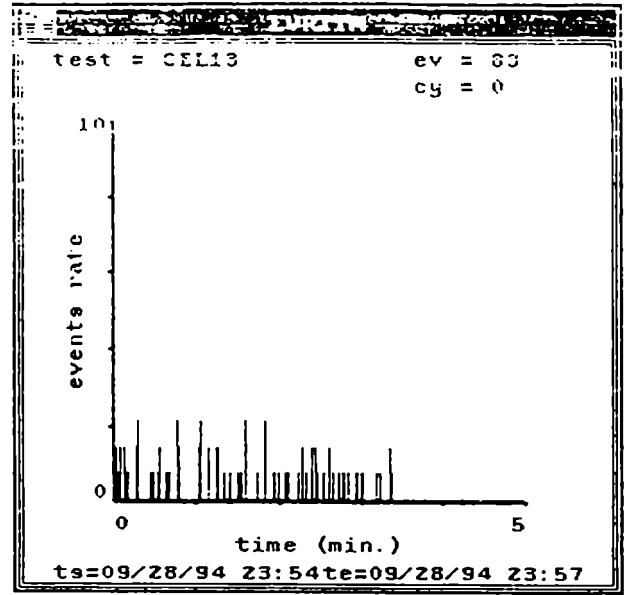
(g)



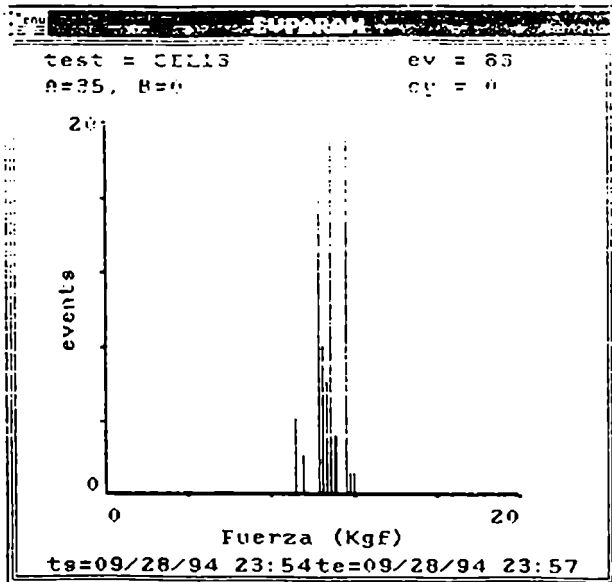
Figura 3.13: CEL13, (a) fuerza y eventos acumulados en función del tiempo, (b) velocidad de eventos en función del tiempo, (c) eventos en función de la fuerza, (d) eventos en función de la energía, (e) histograma de Amplitud, (f) histograma de Duración, (g) histograma de Risetime.



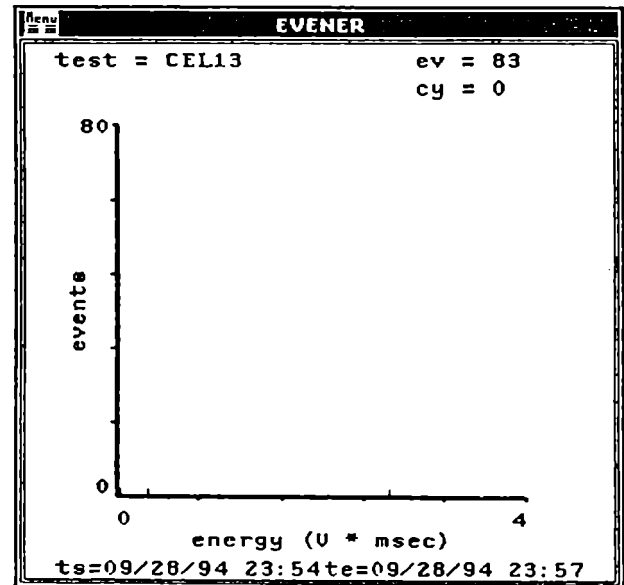
(a)



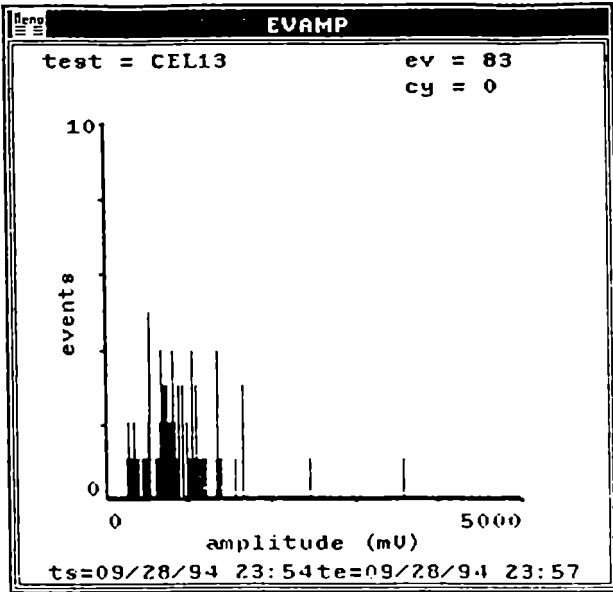
(b)



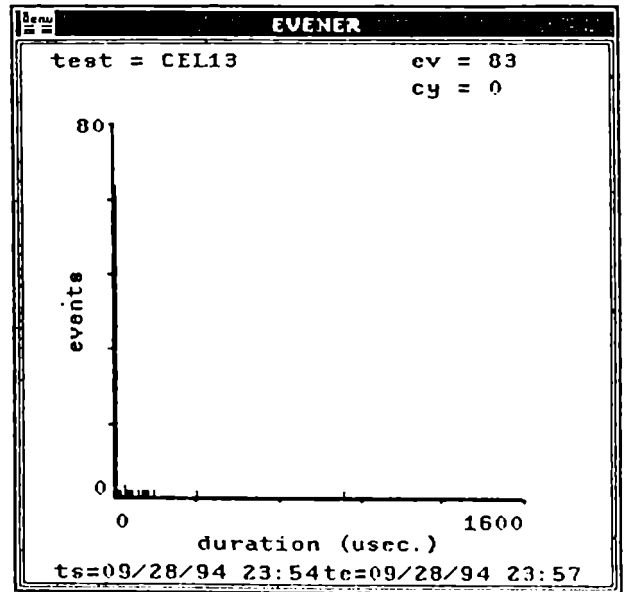
(c)



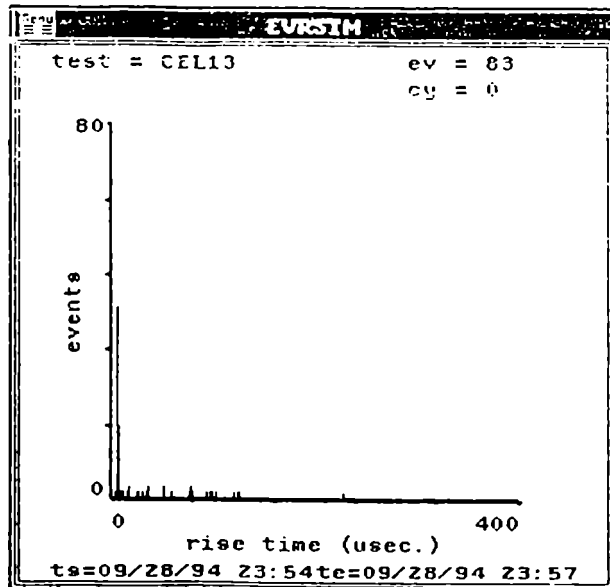
(d)



(e)

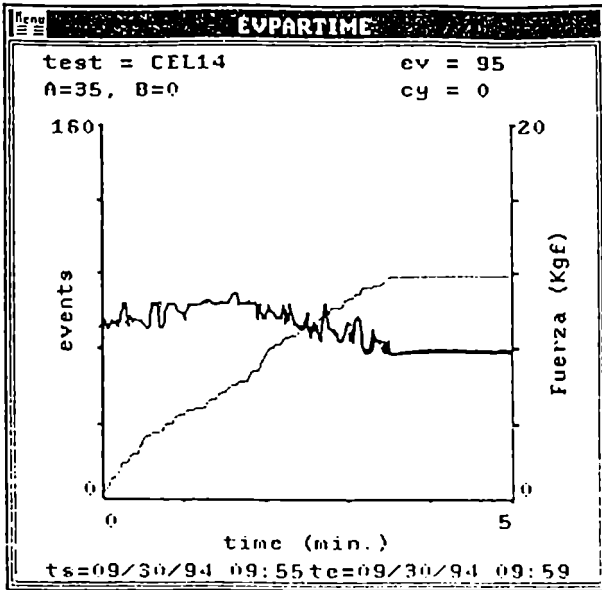


(f)

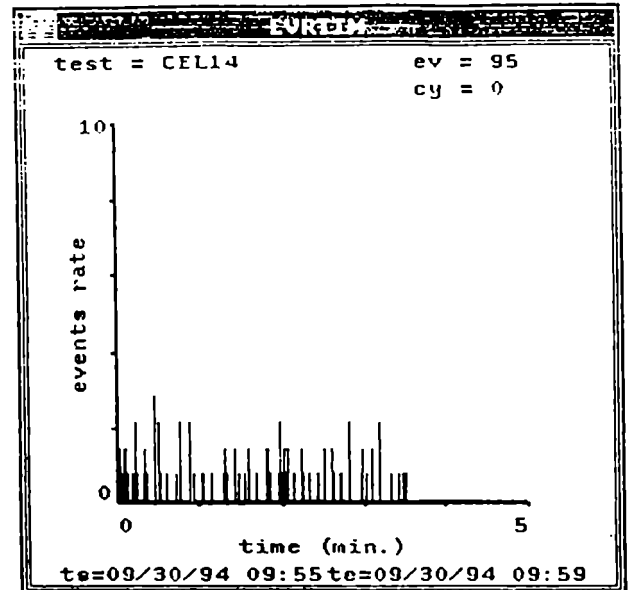


(g)

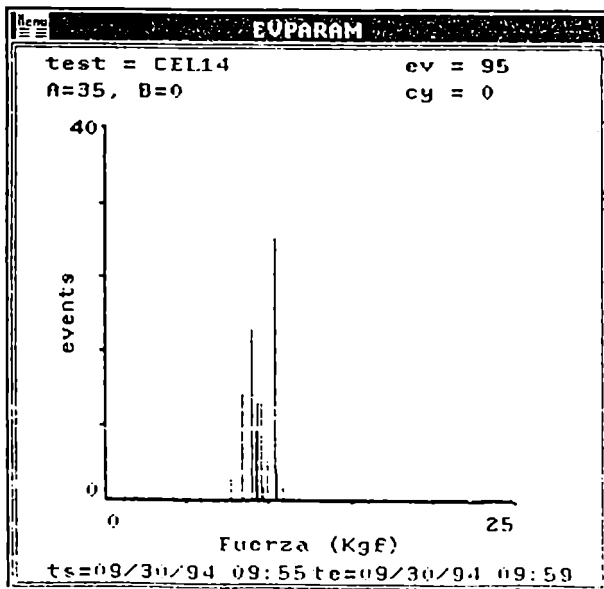
Figura 3.14: CEL14, (a) fuerza y eventos acumulados en función del tiempo, (b) velocidad de eventos en función del tiempo, (c) eventos en función de la fuerza, (d) eventos en función de la energía, (e) histograma de Amplitud, (f) histograma de Duración, (g) histograma de Risetime.



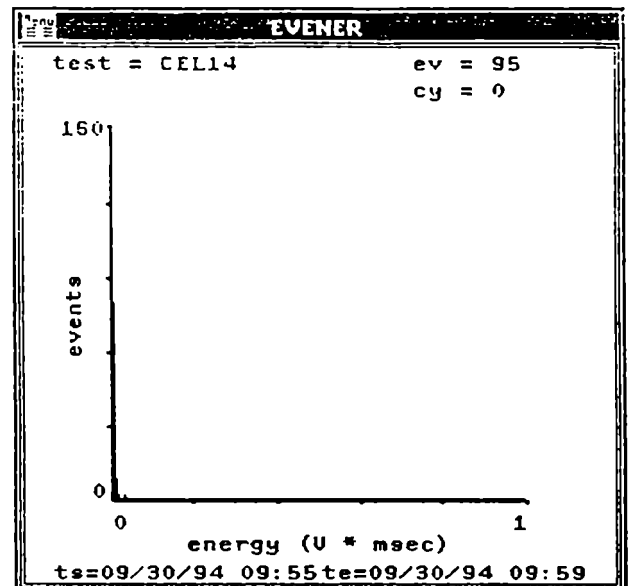
(a)



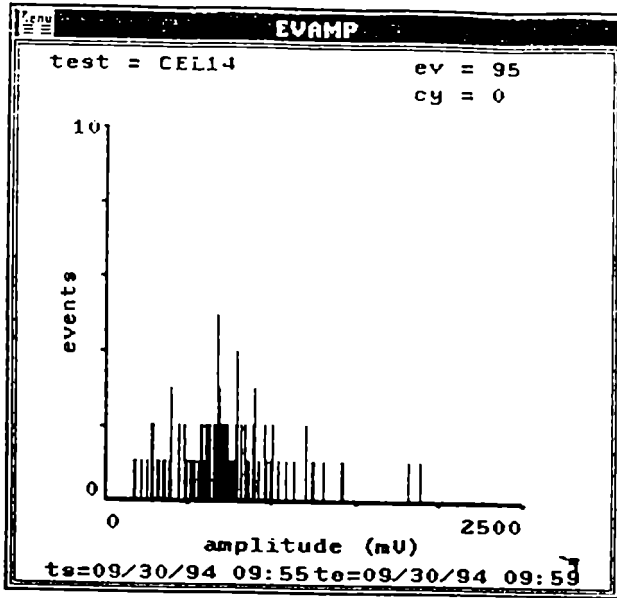
(b)



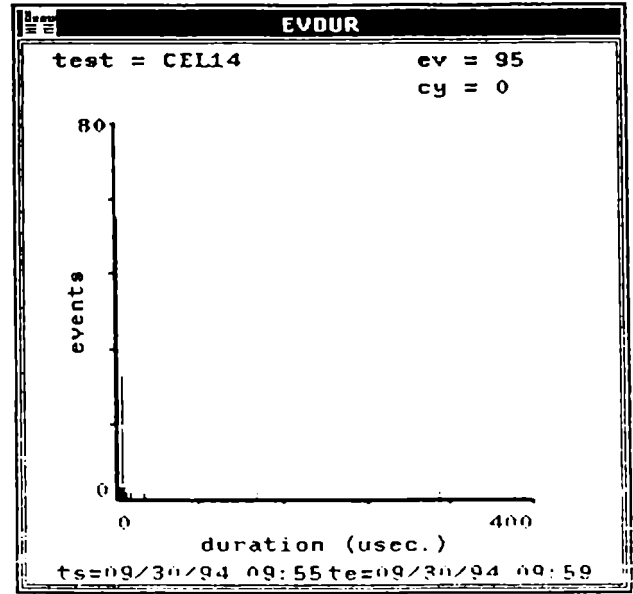
(c)



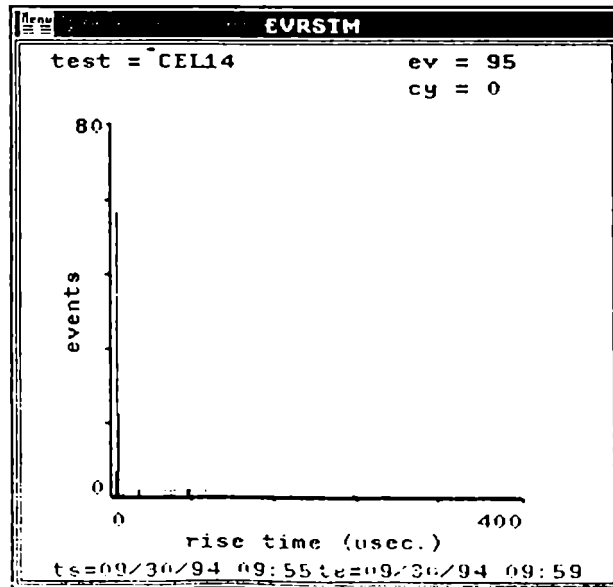
(d)



(e)

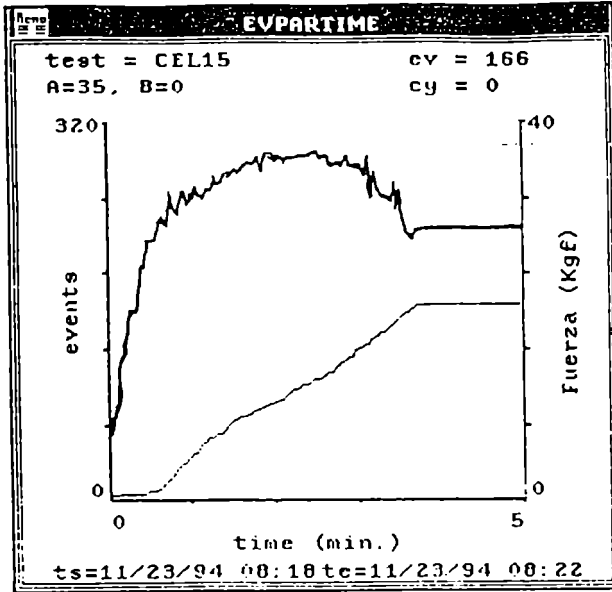


(f)

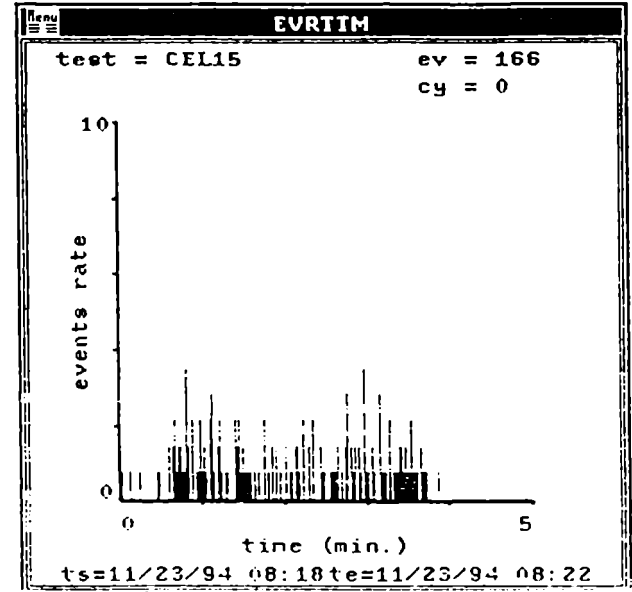


(g)

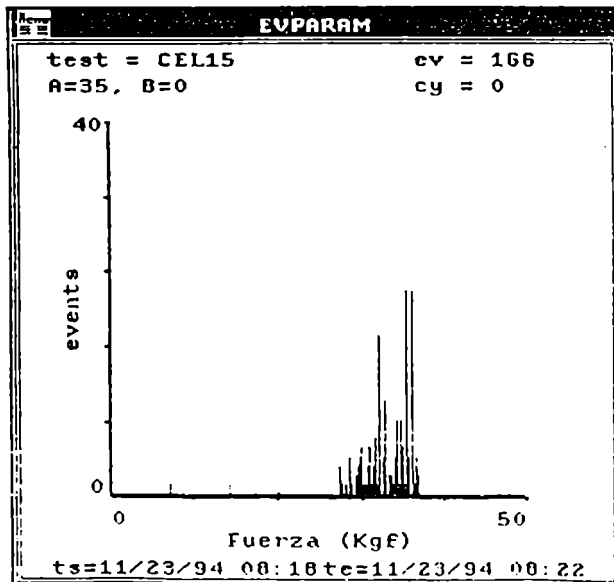
Figura 3.15: CEL15, (a) fuerza y eventos acumulados en función del tiempo, (b) velocidad de eventos en función del tiempo, (c) eventos en función de la fuerza, (d) eventos en función de la energía, (e) histograma de Amplitud, (f) histograma de Duración, (g) histograma de Risetime.



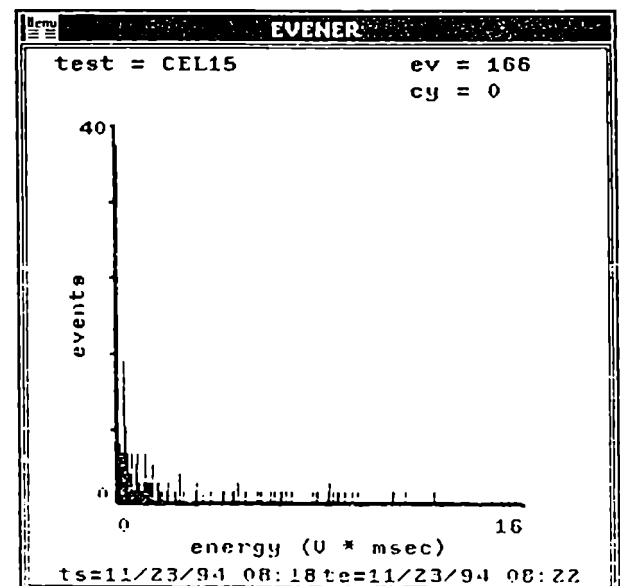
(a)



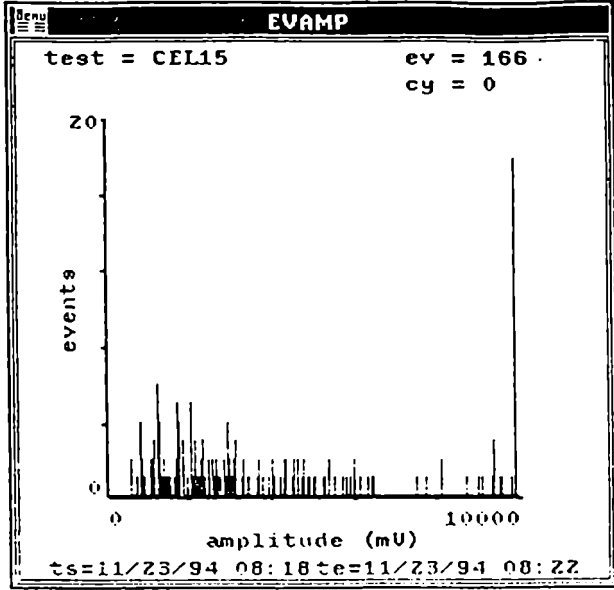
(b)



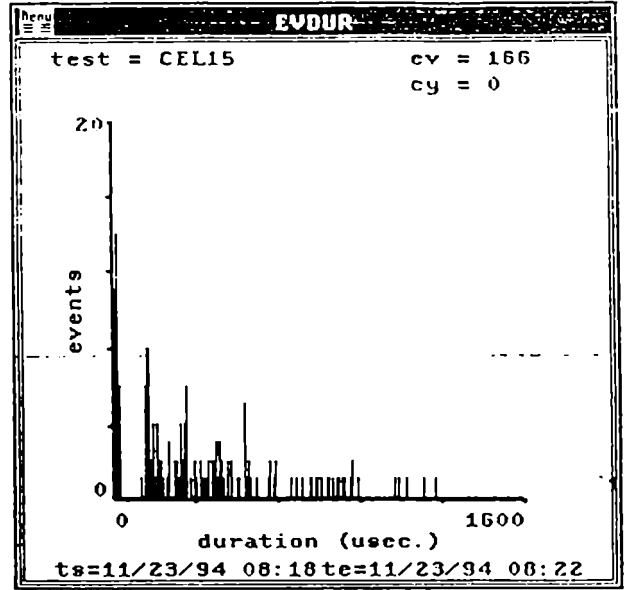
(c)



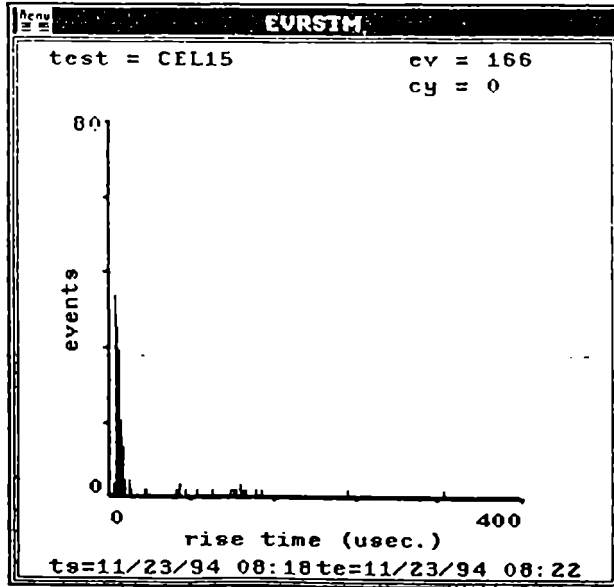
(d)



(e)

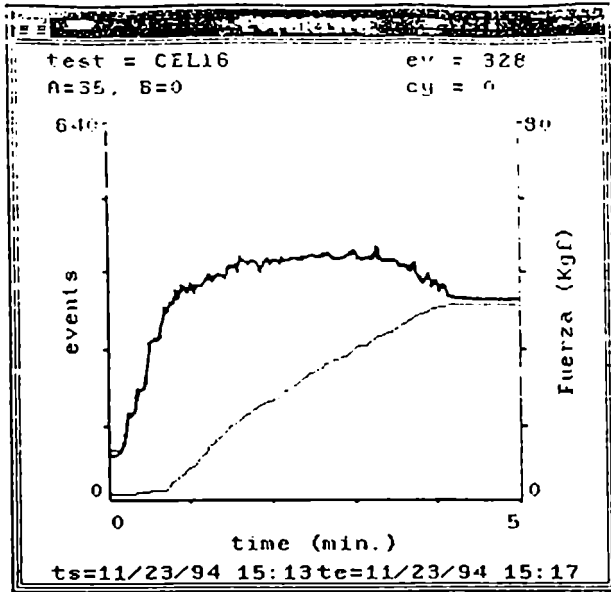


(f)

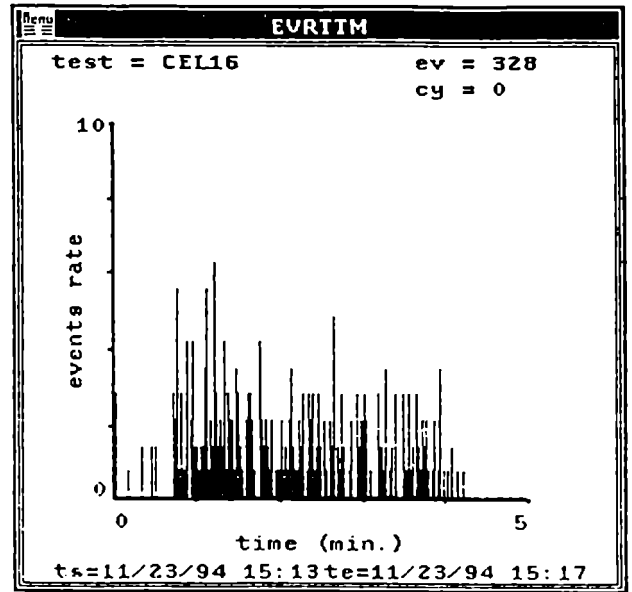


(g)

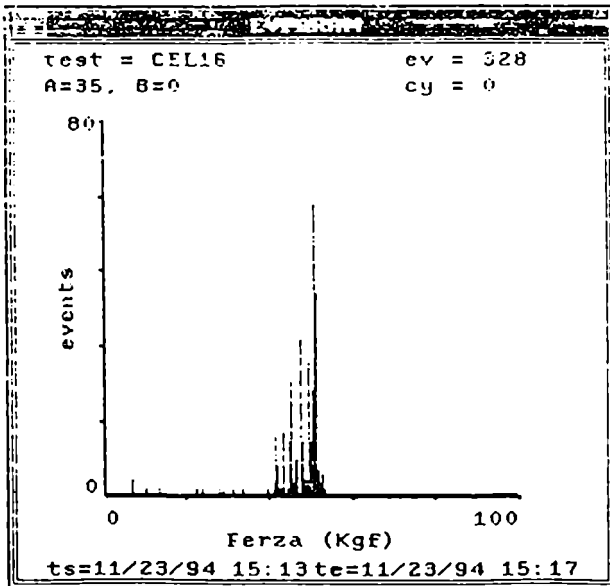
**Figura 3.16:** CEL16, (a) fuerza y eventos acumulados en función del tiempo, (b) velocidad de eventos en función del tiempo, (c) eventos en función de la fuerza, (d) eventos en función de la energía, (e) histograma de Amplitud, (f) histograma de Duración, (g) histograma de Risetime.



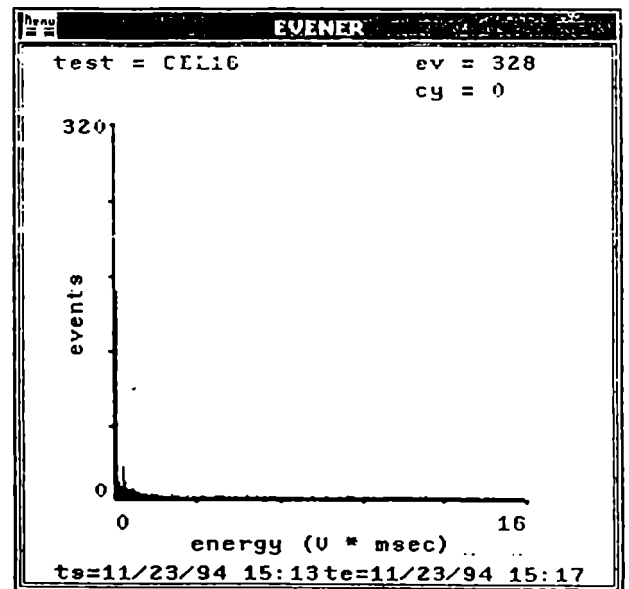
(a)



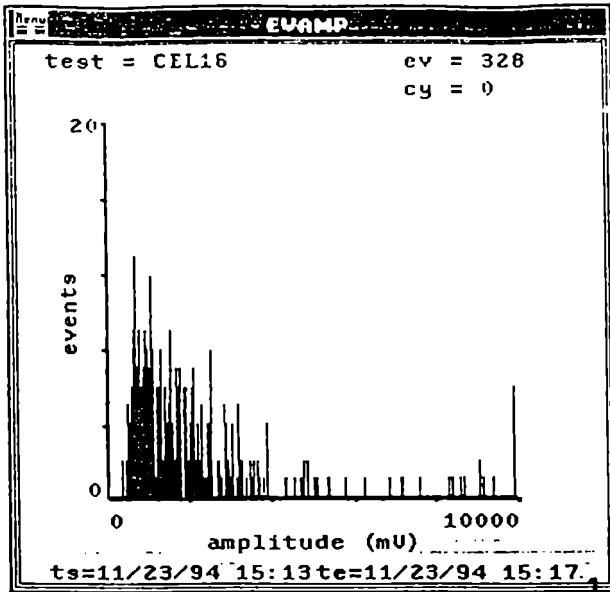
(b)



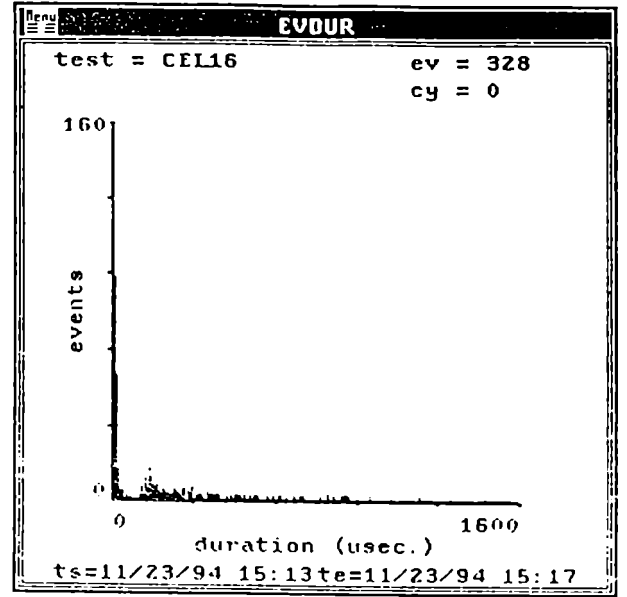
(c)



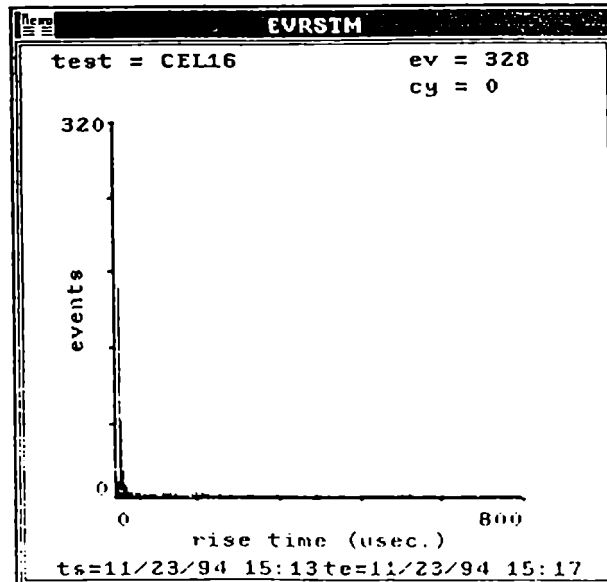
(d)



(e)



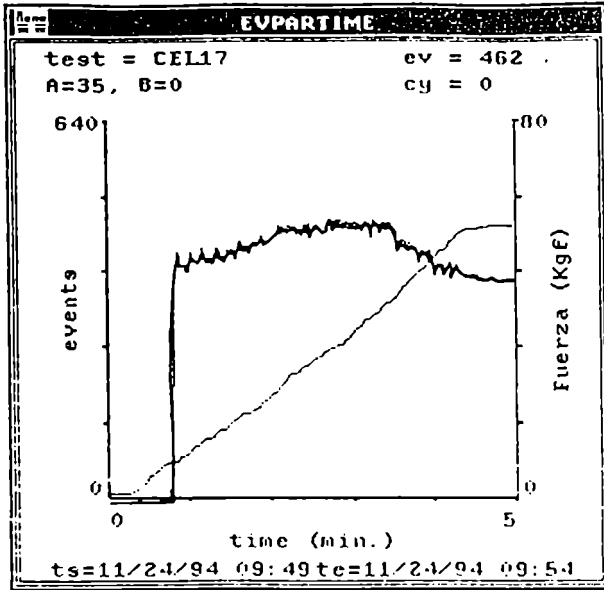
(f)



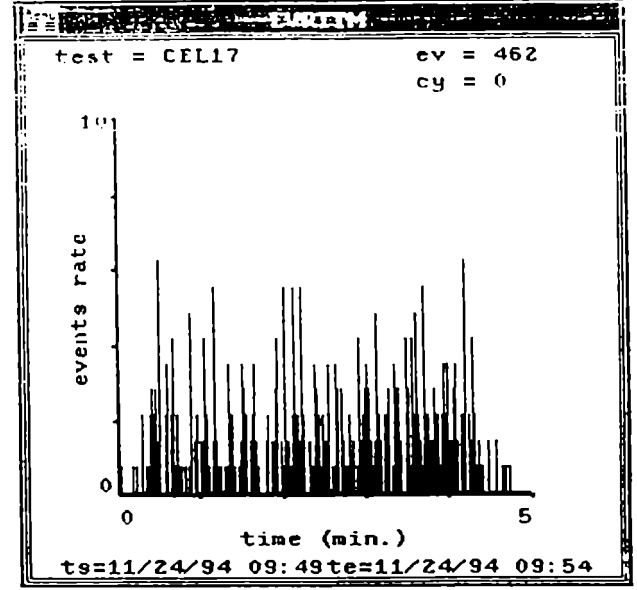
(g)



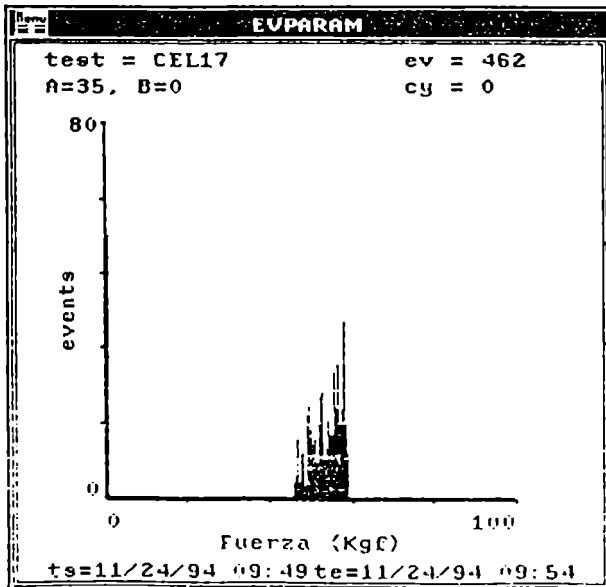
Figura 3.17: CEL17, (a) fuerza y eventos acumulados en función del tiempo, (b) velocidad de eventos en función del tiempo, (c) eventos en función de la fuerza, (d) eventos en función de la energía, (e) histograma de Amplitud, (f) histograma de Duración, (g) histograma de Risetime.



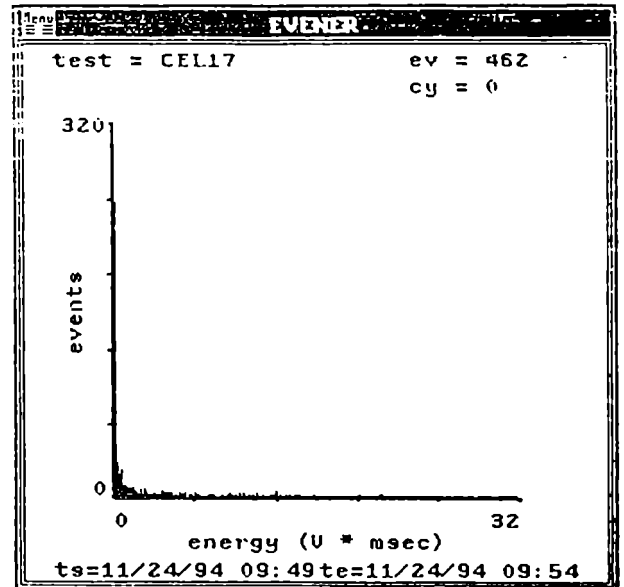
(a)



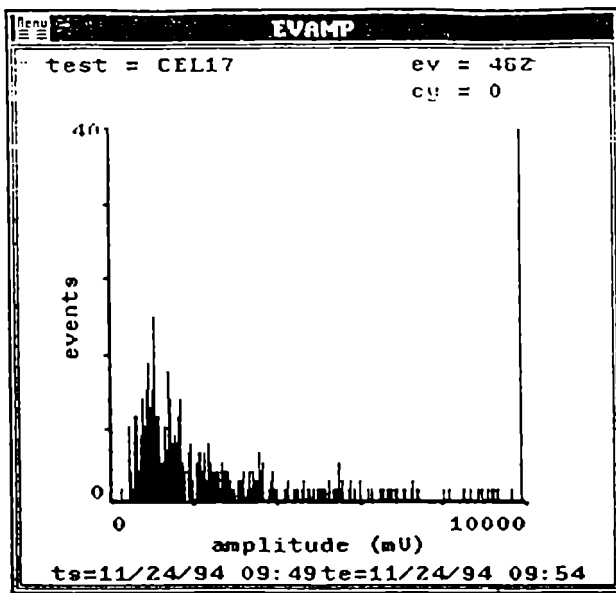
(b)



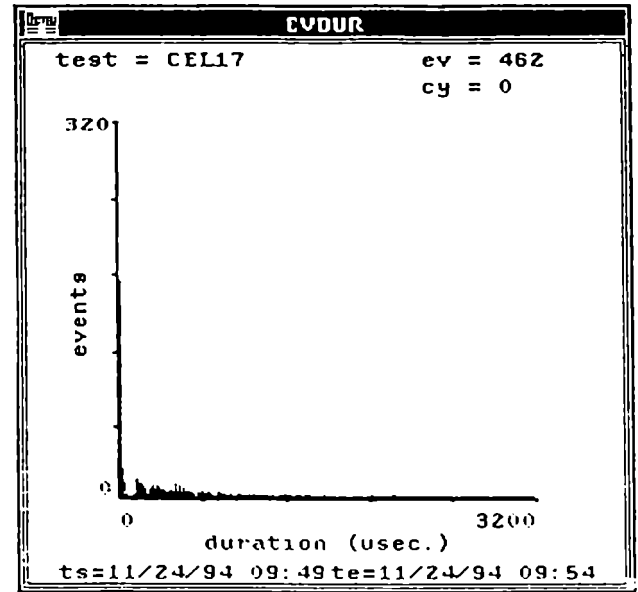
(c)



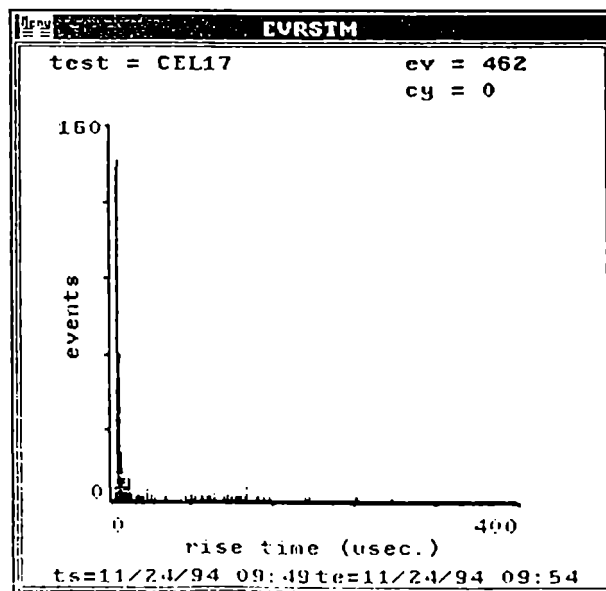
(d)



(e)

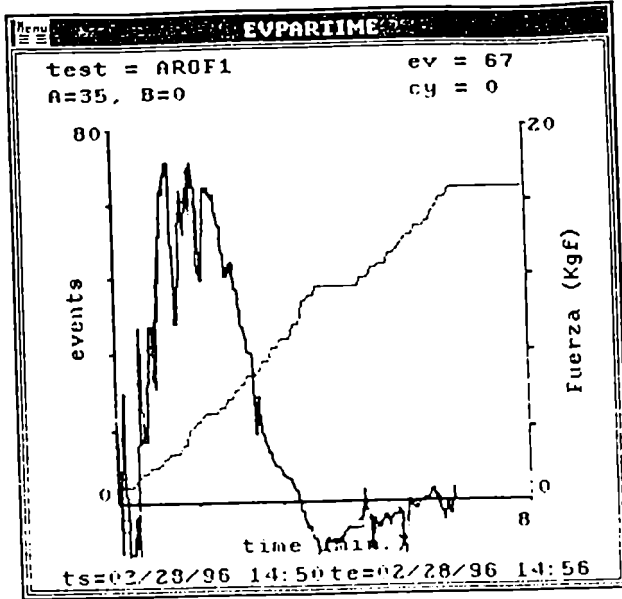


(f)

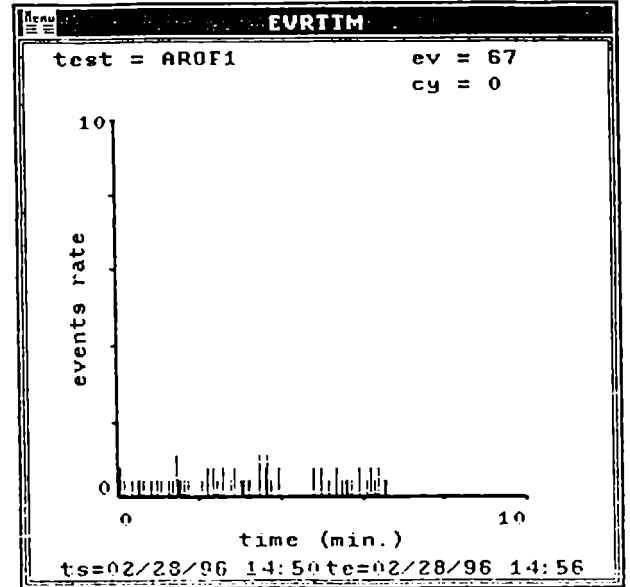


(g)

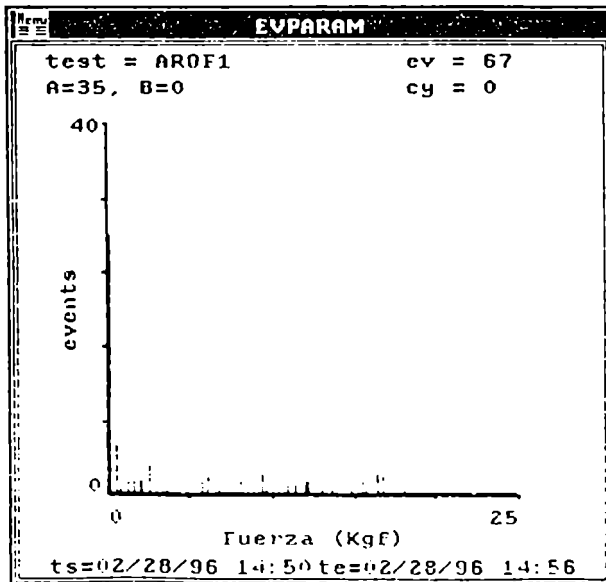
**Figura 3.18:** AROF1, (a) fuerza y eventos acumulados en función del tiempo, (b) velocidad de eventos en función del tiempo, (c) eventos en función de la fuerza, (d) eventos en función de la energía, (e) histograma de Amplitud, (f) histograma de Duración, (g) histograma de Risetime, (h) abertura y eventos acumulados en función del tiempo, (i) eventos en función de la abertura.



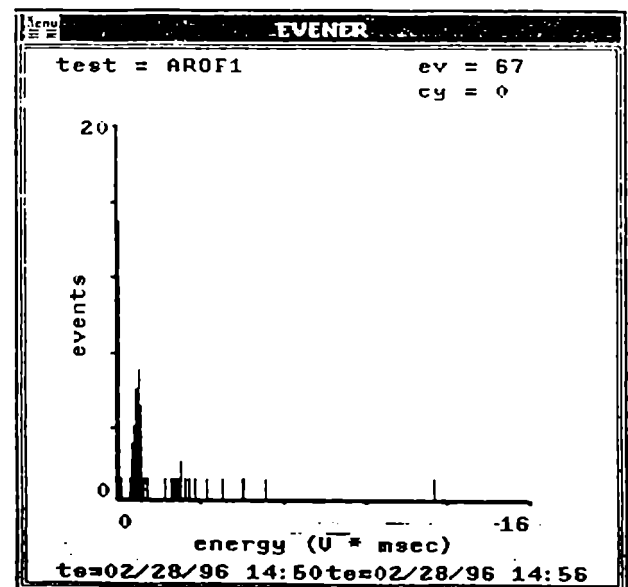
(a)



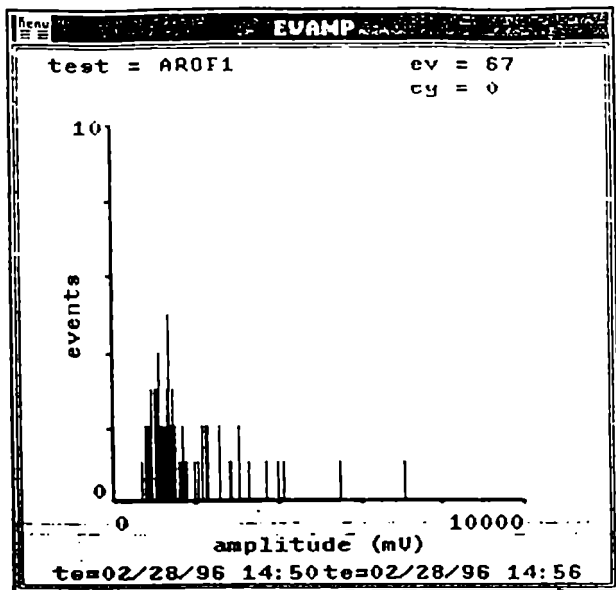
(b)



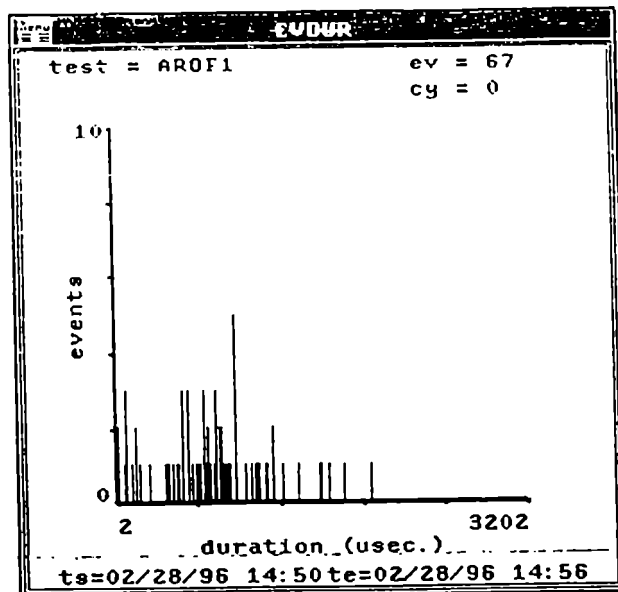
(c)



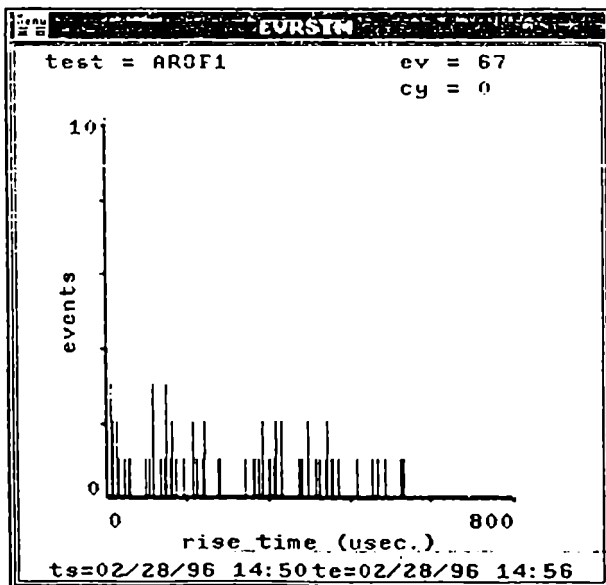
(d)



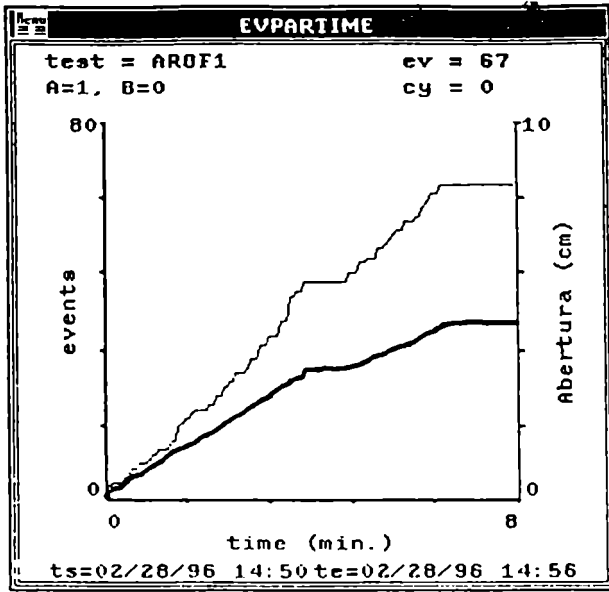
(e)



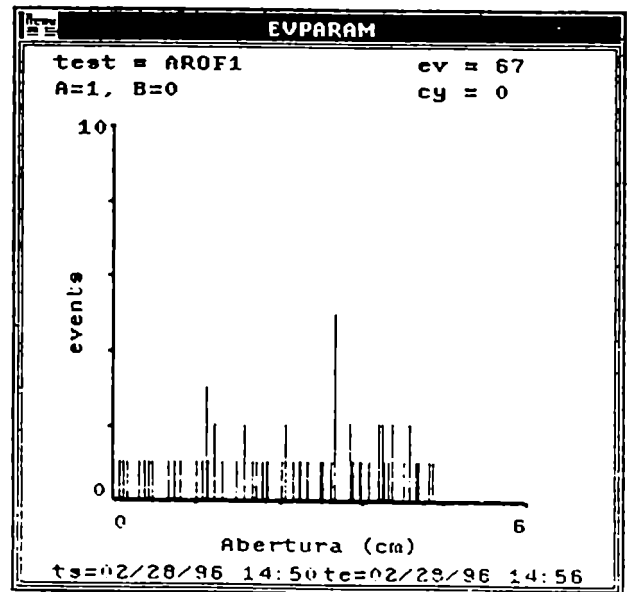
(f)



(g)



(h)



(i)

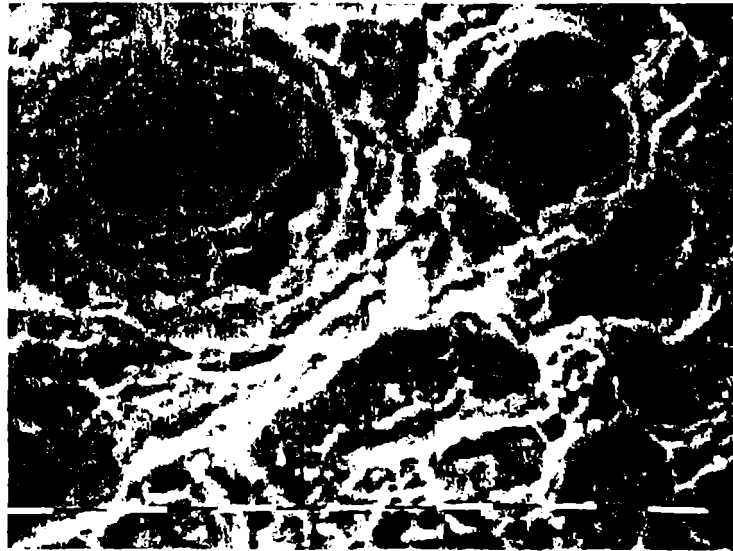
**Figura 3.19: Probeta AROF1, micrografías, (a) 12 aumentos, zona de mecanizado de la muesca, prefisura de fatiga, avance de la prefisura; (b) 800 aumentos, zona de la prefisura, (c) 800 aumentos, zona de avance de la prefisura; (d) 800 aumentos, zona de rotura final (MEB, Comisión Nacional de Energía Atómica).**



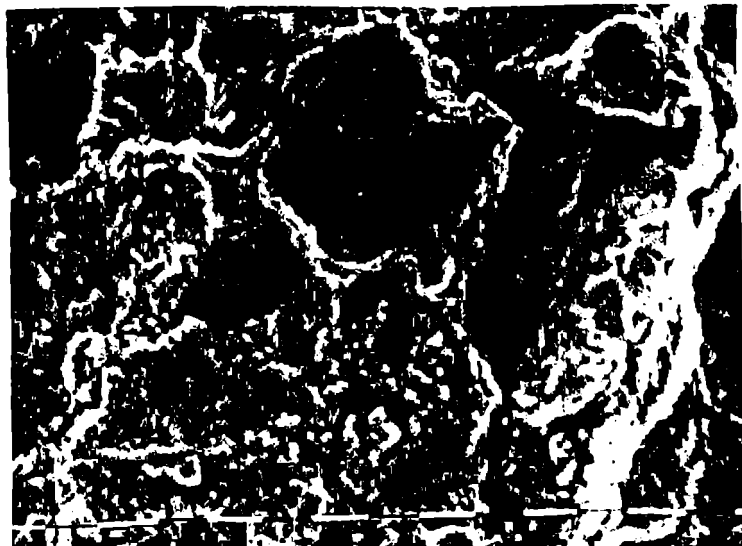
(a)



(b)

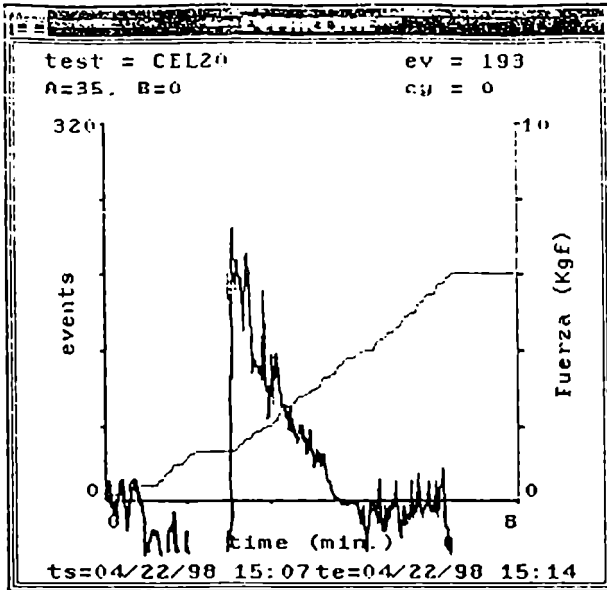


(c)

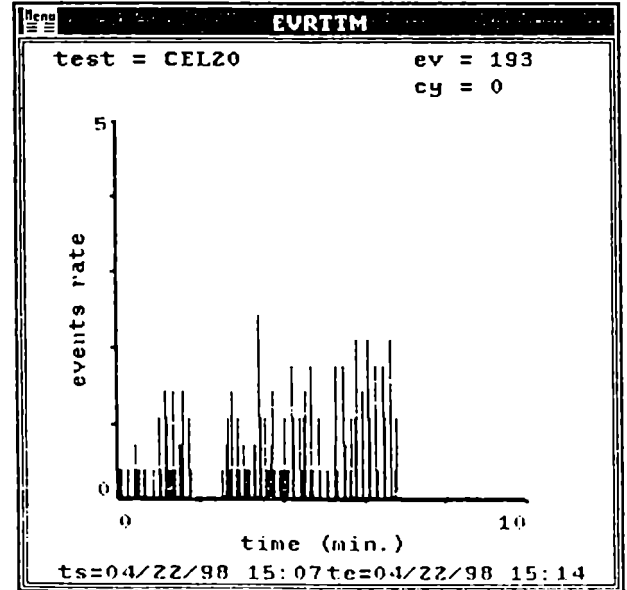


(d)

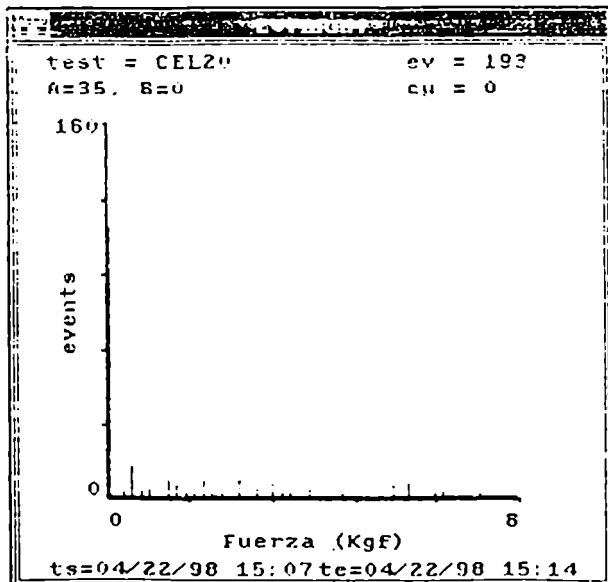
Figura 3.20: CEL20, (a) fuerza y eventos acumulados en función del tiempo, (b) velocidad de eventos en función del tiempo, (c) eventos en función de la fuerza, (d) eventos en función de la energía, (e) histograma de Amplitud, (f) histograma de Duración, (g) histograma de Risetime, (h) abertura y eventos acumulados en función del tiempo, (i) eventos en función de la abertura.



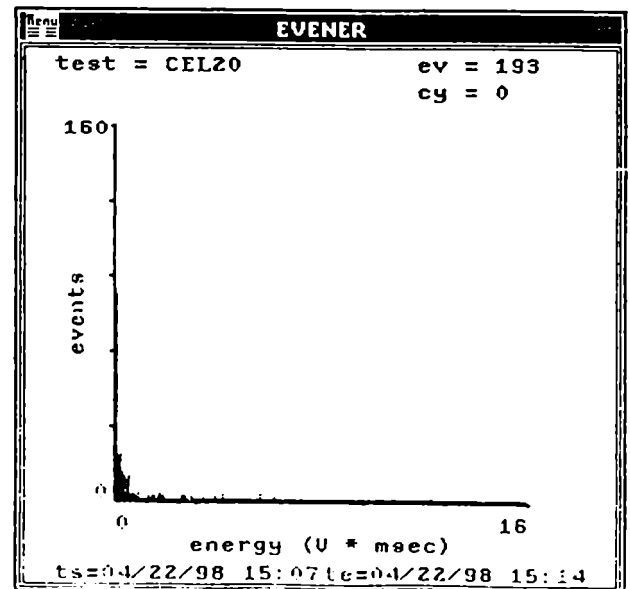
(a)



(b)

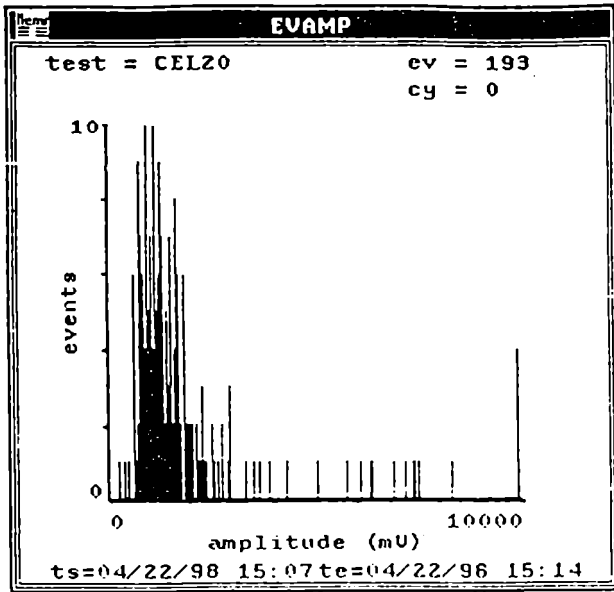


(c)

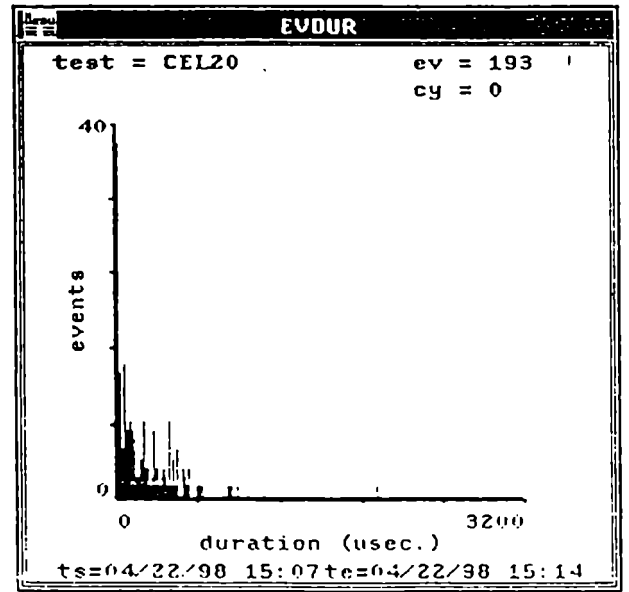


(d)

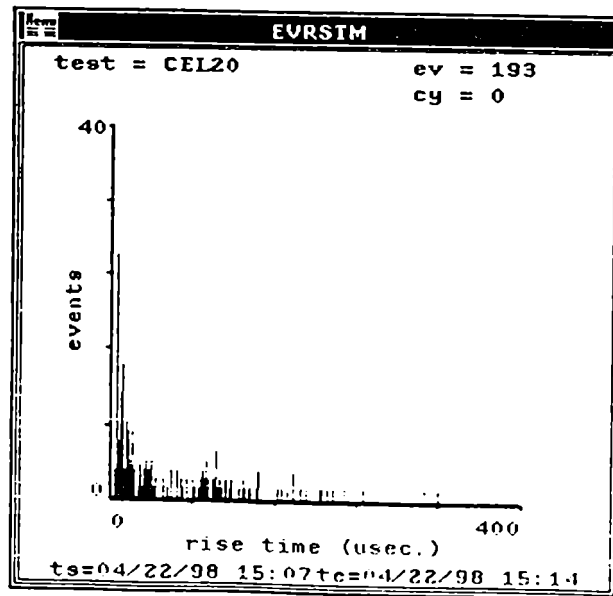




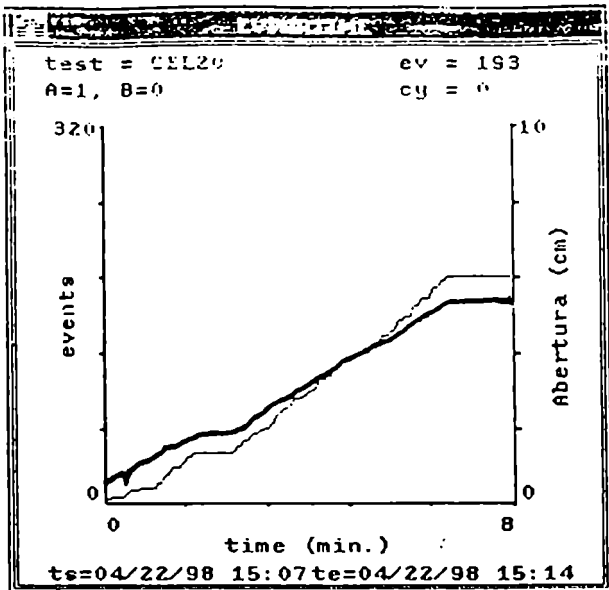
(e)



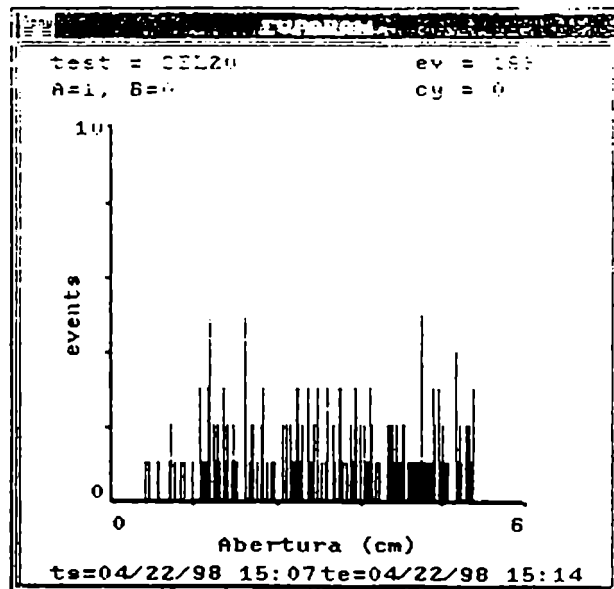
(f)



(g)



(h)



(i)

## 4. DISCUSIÓN

*En este Capítulo se presenta la discusión de los resultados obtenidos en los últimos 12 ensayos (tipos  $\beta$ ,  $\beta_1$ ,  $\alpha$ ,  $\alpha_1$ ,  $\gamma$ ). Primero se analizan los parámetros de las señales de EA en forma global. Luego, para cada ensayo se estudian las distribuciones de los parámetros Duración y Risetime. Posteriormente se analizan las distribuciones de la Amplitud, demostrándose primero la linealidad del transductor de EA, encontrándose luego una explicación física para el ajuste de los histogramas experimentales con la función de distribución Log-normal.*

Debido a la simetría cilíndrica de las probetas, el análisis tridimensional pertinente puede en una primera aproximación reducirse en una dimensión, la axial, de modo que se obtiene una situación bidimensional, donde las fuerzas y deformaciones se pueden descomponer en la dirección radial y angular. De todos modos las fuerzas aplicadas y las deformaciones obtenidas, no pueden ser comparadas sencillamente con el caso unidireccional de los ensayos de tracción tradicionales, donde se asume que tanto las fuerzas como las deformaciones son uniaxiales.

En el caso de los ensayos realizados en los tubos, sobre la parte media superior de la probeta se producen fuerzas de compresión en la parte externa, y de tracción en la parte interna, con gradientes tanto radiales como angulares. Estas fuerzas producen la creación y movimiento de dislocaciones, decohesión y fractura de partículas de segunda fase (del orden de 100 veces más chicas que el grano) y de las inclusiones, y creación y propagación de microfisuras (que probablemente empiezan en la decohesión de las inclusiones y partículas de segunda fase) y fisuras. Como ya se vio, las partículas de segunda fase de Sulfuros de Manganeso son más duras que la matriz, por lo tanto se producirá la decohesión de las mismas y cuando la fuerza aumente lo suficiente, se fracturarán.

La complejidad de los procesos involucrados en la deformación del acero de estas probetas, anisótropo e inhomogéneo, las fuerzas actuantes y la propagación de las ondas elásticas generadas, con las complicaciones adicionales de la reflexión y conversión de modo, todos fenómenos que ocurren en el espacio tridimensional, y el problema de la traducción de la señal producida por el sensor, hacen que sea prácticamente imposible hallar un modelo físico que permita identificar las fuentes de EA en estos tubos. Todos estos fenómenos son, estrictamente hablando, tridimensionales y en conjunto contribuyen a la EA generada. Establecer entonces un modelo que explique la EA obtenida es prácticamente imposible, de modo que se aborda aquí un análisis estadístico de la misma.

Tal como fue comentado en la sección 1.4, uno de los posibles métodos de análisis de la EA es el estadístico. Este método sólo puede extraer correlaciones significativas si hay información relevante escondida en los datos. Para analizar la existencia de esa información, en lo que sigue se empleará este análisis.

#### 4.1 - Valores medios de la EA

Para el análisis estadístico de las señales de EA, se utilizaron fundamentalmente dos paquetes de programas de Estadística para PC: STATISTICA 4.5 y STATGRAPHICS PLUS 3.1, ambos bajo el sistema operativo WINDOWS. En el Apéndice final se definen los principales conceptos estadísticos empleados.

Para tener una primera visión global de todos los ensayos, se calculó para cada uno, el valor medio de los parámetros Amplitud, Duración y Risetime de los eventos de EA, es decir, se identificó cada ensayo por tres números que representaban los valores medios de dichos parámetros. Es conveniente tener en cuenta que con este estudio, se está perdiendo demasiada información, debido a que se resume toda la información de la EA de una probeta, en sus tres valores medios. Al graficar para todos los ensayos, estos tres parámetros en un diagrama tridimensional, donde cada eje representa el valor medio de cada uno de los parámetros de las señales, y donde cada punto de ese espacio tridimensional representa un ensayo (ver figura 4.1), se observó que se producía un particular agrupamiento por tipo de ensayo, y que además el número de eventos totales en cada uno, indicado numéricamente sobre cada punto, también presentaba este mismo agrupamiento. Como ya se señaló, en los ensayos donde las probetas tienen óxido, tipos  $\beta_1$  y  $\alpha_1$ , se produjo la mayor cantidad de eventos.

De lo expuesto se puede afirmar que el valor medio de los parámetros de las señales, que originó en el mismo agrupamiento que los distintos tipos de probeta, parece ser un indicador importante de las fuentes fundamentales de EA.

Estos hechos, ya de por sí auspiciosos, inducían a pensar que tal vez fuera posible diferenciar distintos mecanismos de producción de la EA. Al mismo tiempo ponían en evidencia que esta diferenciación iba a tener que ser analizada estadísticamente<sup>[4-1]</sup>.

En líneas generales, se asume que en los ensayos tipo  $\alpha$  y  $\beta$ , las fuentes de EA se deben a procesos de deformación, y propagación de microfisuras submicroscópicas. En los ensayos  $\alpha_1$  y  $\beta_1$ , además debería agregarse la EA proveniente de la rotura de la capa de óxido. En el ensayo  $\gamma$ , deberían producirse eventos de EA por la deformación y propagación de microfisuras y además, otros, originados en la propagación de la préfisura. Los resultados obtenidos, confirmaron ampliamente estas presunciones, demostrando que la EA producida en cada caso presenta características particulares.

Como resumen se pueden señalar los siguientes aspectos característicos debido a las distintas fuentes de la EA:

a) deformación y propagación de microfisuras (ensayos tipo  $\alpha$  y  $\beta$ ):

- i) tienen bajo número de eventos (17-65 eventos),
- ii) en los ensayos  $\alpha$  (sólo deformación y microfisuras), la Amplitud Media (970-1265 mV), la Duración Media (21-143  $\mu$ s), y el Risetime Medio (15-36  $\mu$ s), son bajos.

b) deformación, propagación de microfisuras y rotura de la capa de óxido (ensayos tipo  $\alpha_1$  y  $\beta_1$ ):

i) tienen claramente un mayor número de eventos (141-332 eventos), producidos gran parte de ellos por la rotura de la capa de óxido,

ii) aumenta la Amplitud Media (1629-3391 mV) y disminuye ligeramente el Risetime (16-23  $\mu$ s).

c) deformación y propagación de microfisuras y fisuras (ensayos tipo  $\beta$  y  $\gamma$ ):

i) la Amplitud Media no es alta (703-1780 mV),

ii) la Duración Media (230-775  $\mu$ s) y el Risetime Medio (59-258  $\mu$ s) son más altos que en los otros ensayos,

iii) en el ensayo  $\gamma$  (propagación de la prefisura), la Duración Media (775  $\mu$ s) y el Risetime Medio (175  $\mu$ s) son bastante más altos que en todos los otros ensayos.

En los gráficos de la figura 4.2, se representan los valores medios, mínimos y máximos, y los rangos intercuartiles (ver Apéndice), para la Amplitud, Duración y Risetime de cada ensayo. Se puede ver allí que el aspecto de las "figuras" obtenidas es en general similar, para los ensayos dentro del mismo tipo, pero diferente, entre distinto tipo de ensayos. La mayor discrepancia dentro de un mismo grupo, se registra en el caso del ensayo CEL20, probablemente la causa haya sido el cambio de cables conectores, mejorando así la recepción de las señales de EA permitiendo el registro de mayor número de eventos.

## **4.2 - Estudio temporal de los parámetros**

En los ensayos, la EA se produce por la deformación del material a lo largo del tiempo, de modo que resulta razonable continuar analizando la influencia de esta magnitud en los parámetros que caracterizan a los eventos. Debe recordarse que la velocidad de deformación (velocidad de separación de las mordazas) se mantuvo prácticamente constante en todos los ensayos.

Se estudiaron los cambios en los valores de Amplitud, Duración y Risetime a medida que transcurre el ensayo, considerando a los eventos ordenados en el tiempo. En primera instancia no se tuvo en cuenta la distancia temporal que existe entre dos eventos consecutivos, sino sólo su orden de aparición. A modo de ejemplo se muestra en la figura 4.3 el valor de la Amplitud de cada evento, ordenados según su orden de aparición, para la probeta AROF1. A simple vista no se comprueba una tendencia marcada a lo largo del tiempo, el estudio de tendencia lineal tampoco la puso en evidencia ya que la pendiente de la recta no resultó significativa, demostrando que no existe una tendencia lineal en el comportamiento de la Amplitud a lo largo del tiempo<sup>[4-2]</sup>.

Intentando buscar algún otro tipo de tendencia, se utilizó la técnica de las medias móviles. Dicha técnica va calculando las medias sucesivas de las observaciones, tomando en grupo cinco valores consecutivos, intentando eliminar así el comportamiento cíclico, basta ver la figura 4.4 para verificar que tampoco existe una tendencia marcada.

Esta característica se comprobó en las distintas probetas, para los tres parámetros: Amplitud, Duración y Risetime, y la conclusión fue siempre la misma: no existen suficientes indicadores que hagan pensar en una tendencia claramente marcada a medida que los eventos son registrados. Cualquiera de estos parámetros a medida que pasa el tiempo aumenta, luego disminuye, luego vuelve a aumentar, no revelando una tendencia determinada.

Por lo tanto, considerando los eventos ordenados en el tiempo, no existe evidencia clara para afirmar que las variables Amplitud, Duración y Risetime, mantienen una determinada ley de variación a medida que transcurre el tiempo.

### 4.3 - Valores de correlación

Para estudiar la dependencia entre los tres parámetros de las señales, se calculó la correlación lineal entre ellos. En la tabla 4-1 se resumen los resultados para cada ensayo.

Tabla 4-1: valores de correlación para cada ensayo.

Nombre	Tipo	Correlación		
		Amplitud-Duración	Amplitud-Risetime	Duración-Risetime
CEL8	$\beta$	0.85	- 0.32	0.08
CEL9	$\beta$	0.72	0.21	0.55
CEL11	$\beta$	0.58	0.23	0.70
CEL10	$\beta_1$	0.66	- 0.04	0.48
CEL12	$\alpha$	0.46	0.09	0.67
CEL13	$\alpha$	0.71	0.01	0.51
CEL14	$\alpha$	- 0.19	- 0.23	1.00
CEL15	$\alpha_1$	0.68	- 0.21	0.32
CEL16	$\alpha_1$	0.55	- 0.08	0.50
CEL17	$\alpha_1$	0.46	- 0.14	0.13
AROF1	$\gamma$	0.66	- 0.09	0.40

CEL20	$\beta$	0.44	- 0.09	0.46
-------	---------	------	--------	------

Como puede verse, la mayor tendencia en la correlación se da entre la Amplitud y la Duración, siendo menor en los otros casos. En el ensayo CEL14, se dio una situación inusual, entre la Duración y el Risetime se obtuvo una correlación igual a 1, siendo mucho menor en los otros dos parámetros, además de ser ambas negativas; pero éste fue el único caso de alta correlación entre estos dos parámetros, por lo tanto no se le asignó significado estadístico. De lo expuesto no se puede deducir ninguna correlación lineal definida entre los parámetros de las señales de EA. Por lo tanto se concluye que cada evento debe ser analizado considerando sus tres parámetros simultáneamente, tal como se hizo en las secciones anteriores.

#### 4.4 - Comparación de los parámetros

Luego se buscó<sup>[4-2]</sup> ver la existencia de diferencias o similitudes entre los valores medios de la Amplitud, Duración y Risetime de los distintos ensayos, utilizando la herramienta matemática del Análisis de Varianza (ANOVA, ver Apéndice). Las hipótesis básicas de esta técnica, son la normalidad de los datos (que sus distribuciones respondan a curvas Gaussianas) y la igualdad de la varianza (ver Apéndice) en todos los ensayos.

La primera dificultad consistió en comparar valores medios de diferentes grupos, cuyas distribuciones, como se verá detalladamente en las secciones 4.6, 4.7 y 4.8, no pueden ser consideradas normales (Gaussianas) y presentan una asimetría positiva (ver Apéndice). Para que en el peor de los casos, se pudiera amortiguar la asimetría positiva de todos los histogramas, se le aplicó a todos los datos la misma transformación, trabajándose con los logaritmos neperianos de los datos originales.

Al hacer luego el chequeo de la igualdad de la varianza, ahora sobre las variables Log(Amplitud), Log(Duración) y Log(Risetime) de todos los ensayos, debido a que el valor-p calculado por el software (ver Apéndice), fue menor que el nivel de significación elegido ( $\alpha = 0.05$ , ver Apéndice), en los tres parámetros, la conclusión fue que había que rechazar que las variables Log(Amplitud), Log(Duración) y Log(Risetime), tuvieran la misma varianza en todas las probetas, es decir, no se puede aceptar que todos los ensayos tengan las mismas varianzas en las tres variables.

En este caso sí se pudo salvar la asimetría de los datos (al aplicar el logaritmo), pero sigue existiendo el problema de la no igualdad de varianzas. Este último hecho influye negativamente en la fiabilidad de los resultados. Se debería encontrar una transformación adecuada de los datos, que salvase el problema, pero al desconocerse completamente qué transformación sería la adecuada, se hizo la comparación de los valores medios con el método ANOVA tradicional, teniéndose en cuenta que las estimaciones estarían sujetas a un mayor error tipo I (ver Apéndice), debido a que los grupos no mantienen varianzas homogéneas.

Al hacer ahora el análisis de los valores medios, el resultado del ANOVA indicó que considerando todos los ensayos juntos, había que rechazar ampliamente la igualdad de los valores medios para las distintas probetas. Como las hipótesis del ANOVA no se cumplen exactamente, para una mayor seguridad se utilizó el método no paramétrico de Kruskal-Wallis, basado en el cálculo de rangos, que puede ser aplicado en el caso general en el que se desconocen las distribuciones de las variables en estudio, tal como en el presente este caso. El resultado final fue análogo al obtenido con el ANOVA, se rechaza la igualdad de los valores medios del Log(Amplitud), Log(Duración) y Log(Risetime).

Es evidente entonces, que los tres parámetros de las señales de EA tienen un comportamiento diferente, a nivel medio y a nivel de varianza, dependiendo de la probeta que se utilice. Estos hechos, nuevamente confirman que los tres parámetros simultáneamente caracterizan la EA producida en cada ensayo.

#### **4.5 - Agrupamiento de los ensayos en clusters**

Hasta aquí se ha rechazado la igualdad de valores medios entre las distintas probetas, pero no se sabe en qué probetas se encuentra la diferencia.

Siguiendo con el tratamiento más sencillo y profundizando el estudio iniciado en la sección 4.1, se analizaron aquí las probetas mediante el análisis estadístico del valor medio de sus parámetros, valorando ahora los tres parámetros de las señales simultáneamente para hacer un análisis de "clusters".

Cada probeta fue así definida por el valor medio de la Amplitud, Duración y Risetime de todos sus eventos. Se observó luego la similitud entre los valores medios de las distintas probetas. La metodología seguida fue pedir al software estadístico, que existieran 5 grupos ("clusters"), tantos como distinto tipo de probetas ( $\alpha$ ,  $\alpha_1$ ,  $\beta$ ,  $\beta_1$ ,  $\gamma$ ). En la figura 4.5 se puede observar la agrupación en "clusters", obtenida con el método de las K-medias (ver Apéndice). Es muy interesante comprobar una vez más, que los grupos formados coinciden totalmente con los 5 tipos de probetas ensayadas.

Este último hecho permite inferir, que los valores medios de los parámetros de las señales de EA reflejan las diferencias en el tipo de probeta y por lo tanto en las fuentes de EA. Se obtuvo así la comprobación estadística de la apreciación general ya señalada en la sección 4.1.

##### **4.5.1 - Análisis estadístico dentro de cada tipo de ensayo**

Para estudiar las semejanzas o diferencias dentro de cada tipo de ensayo, éstos fueron analizados por separado<sup>[4-2]</sup>.



a) Ensayo tipo  $\alpha$  (probetas con adelgazamiento):

Primero se chequeó la igualdad de varianza para las variables: Log(Amplitud), Log(Duración) y Log(Risetime) respectivamente, entre las probetas CEL12, CEL13 y CEL14.

Debido a que el valor-p fue mayor que el nivel de significación elegido (0.05), en los tres parámetros, la conclusión fue aceptar la igualdad de la varianza dentro del ensayo  $\alpha$ , para las tres variables.

El ANOVA para el Log(Amplitud), demostró que no existen diferencias significativas entre las medias de las tres probetas, ya que se obtuvo un valor-p mayor que 0.05.

El ANOVA para el Log(Duración), demostró que sí existen diferencias significativas entre las medias de las tres probetas (valor-p menor que 0.05), revelando que la probeta CEL12 tiene un comportamiento medio diferente para la variable Log(Duración), comparado con las probetas CEL13 y CEL14.

El ANOVA para el Log(Risetime), demostró que no existen diferencias significativas entre las medias de las tres probetas, ya que se obtuvo un valor-p mayor que 0.05.

Se puede concluir afirmando que las probetas CEL13 y CEL14 son dos réplicas del mismo ensayo. La probeta CEL12 es prácticamente idéntica, en comportamiento medio, pero existe una diferencia ligeramente significativa en cuanto a la variable Log(Duración). Esta diferencia no fue registrada en la agrupación en clusters de las medias, debido a que el comportamiento medio del resto de las variables, Log(Amplitud) y Log(Risetime), es prácticamente idéntico.

b) Ensayos tipo  $\alpha_1$  (probetas con adelgazamiento y con óxido):

Primero se chequeó la igualdad de varianza para las variables: Log(Amplitud), Log(Duración) y Log(Risetime) respectivamente, entre las probetas CEL15, CEL16 y CEL17.

Para el Log(Amplitud), debido a que el valor-p fue mayor que 0.05, la conclusión fue aceptar la igualdad de la varianza.

Para el Log(Duración) y el Log(Risetime), la igualdad de varianza no está demasiado clara ya que se obtuvieron valores-p muy cercanos a 0.05.

Aunque no se está en condiciones óptimas, igual se aplicó el test ANOVA, de análisis de varianza. Resumiendo los resultados, se obtuvo que existen diferencias significativas entre las medias de las variables Log(Duración) y el Log(Risetime), con valores-p menores que 0.05n no así en el Log(Amplitud). En ambos casos la probeta CEL15 es la que mantiene diferencias con respecto a las otras dos.

c) Ensayos tipo  $\beta$  (probetas con muesca):

Primero se chequeó la igualdad de varianza para las variables: Log(Amplitud), Log(Duración) y Log(Risetime) respectivamente, entre las probetas CEL8, CEL9, CEL11 y CEL20.

Para el Logaritmo de la Amplitud, debido a que el valor-p fue menor que 0.05, la conclusión fue rechazar la igualdad de la varianza, es decir que existen diferencias significativas del comportamiento medio de la varianza entre las distintas probetas.

Para las variables Log(Duración) y Log(Risetime) respectivamente, se aceptó la igualdad de varianzas ya que en ambos casos se obtuvo un valor-p mayor que 0.05.

Al estudiar el comportamiento medio de la variable Log(Amplitud), se rechaza la igualdad de las medias, ya que el valor-p fue menor que 0.05.

En el caso de las variables Log(Duración) y Log(Risetime), se acepta la igualdad del comportamiento medio entre estas cuatro probetas, debido a que con el ANOVA se obtuvieron valores de valor-p mayores que 0.05.

**Resumiendo:** con respecto a las varianzas de las tres magnitudes estudiadas en todos los ensayos, se puede afirmar que las varianzas de la Amplitud, Duración y Risetime, no son las mismas, dependiendo del tipo de probeta. En un mismo grupo de ensayos, sí se manifiesta un comportamiento homogéneo en la varianza, salvo en los ensayos  $\alpha_1$  donde se encuentra la mayor disparidad.

Con respecto a los valores medios, queda claro que las medias de las variables Log(Amplitud), Log(Duración) y Log(Risetime), no tienen un mismo comportamiento entre ensayos, pero sí en las probetas que representan el mismo tipo de ensayo, excepto en la probeta CEL15. No obstante, por regla general, a través del comportamiento medio de las variables, quedan claramente diferenciados los grupos, es decir, la EA global de cada grupo.

#### 4.5.2 - Interpretación en cada tipo de ensayo

En esta parte se presenta una serie de gráficos que permiten tener una idea global de cada tipo de ensayo ( $\alpha$ ,  $\alpha_1$ ,  $\beta$ ,  $\beta_1$ ,  $\gamma$ ). En cada uno de ellos (ver figuras 4.6, 4.7, 4.8, 4.9 y 4.10) se dibujaron 4 curvas, correspondientes a los valores de Amplitud, en el eje vertical izquierdo, Duración, Risetime y Fuerza (multiplicada por 10), en el eje vertical derecho, para cada tipo de ensayo. Todos los valores se han graficado en función del número de evento, que de alguna manera está relacionado con la evolución temporal, ya que, los primeros eventos corresponden al comienzo del ensayo, y los últimos al final. En una rápida inspección de todos los gráficos se ve claramente lo expuesto en la sección 4.2, referido a que no se nota una tendencia marcada de crecimiento o decrecimiento de los tres parámetros de las señales de EA a medida que transcurre el tiempo.

##### a) Ensayos $\alpha$ (con adelgazamiento)

En la figura 4.6 se presentan los datos para los ensayos CEL12, CEL13 y CEL14.

En estos tres ensayos, sólo se produce deformación del aro en la zona con el adelgazamiento, de modo que la EA debería ser originada sólo por la deformación, es decir, el movimiento de las dislocaciones, y la propagación de pequeñísimas microfisuras submicroscópicas, que podrían ser originadas en la decohesión o fractura de las inclusiones. El rango de variación de la fuerza es el mismo en todos los casos (hasta un máximo de alrededor de 20 Kgf). Se puede ver también que a los eventos de mayor Duración les corresponde mayor Risetime.

b) Ensayos  $\alpha_1$  (con adelgazamiento y con óxido):

En la figura 4.7 se graficaron los datos para los ensayos CEL15, CEL16 y CEL17.

En este caso debido a que a los aros no se les eliminó la capa de óxido, las probetas tienen un espesor ligeramente mayor, esto hizo que los valores de fuerza necesarios para abrir los aros fueran también mayores (hasta un máximo de 50 Kgf). Aquí no sólo se produjeron los fenómenos citados en el punto anterior, sino que simultáneamente se iba fisurando la capa de óxido, y saltaban pequeñas partículas, estos dos últimos fenómenos hicieron que se produjera gran cantidad de EA, con muchos eventos de valores de Amplitud mucho más grandes que en el caso anterior. También los valores de Duración fueron más altos que en a) y los valores de Risetime ligeramente menores.

c) Ensayos tipo  $\beta$  (con muesca):

En la figura 4.8 se graficaron los datos para los ensayos CEL8, CEL9, CEL11 y CEL20.

En estos cuatro ensayos, se produce deformación del aro en la zona de la muesca, es decir el movimiento de las dislocaciones, y la propagación de pequeñas microfisuras tal como se vio en las micrografías de la figura 3.9 del capítulo anterior.

Los valores de la Fuerza, Amplitud, Duración y Risetime son similares en todos los gráficos, excepto en el CEL20 que presenta algunas particularidades: los valores de las Amplitudes son mayores, mientras que los correspondientes a la Fuerza son mucho menores, probablemente debidos a un mal funcionamiento del sistema de medición de la celda de carga, además en esta última probeta se obtuvo mayor cantidad de eventos que en las otras tres, como ya fue comentado.

d) Ensayos tipo  $\beta_1$  (con muesca y con óxido):

En la figura 4.9 se graficaron los datos para el ensayo CEL10. Se comprueba que el rango de fuerzas es similar al caso anterior, pero hay mayor cantidad de eventos debidos a la rotura de la capa de óxido. La Amplitud de estos eventos es también mayor que en el caso anterior, no habiendo gran diferencia en el caso de la Duración y el Risetime.

e) Ensayo tipo y (con muesca y prefisura por fatiga):

En la figura 4.10 se graficaron los datos para el ensayo AROF1.

Se ve cómo se produce la disminución de la Fuerza al relajarse las tensiones por la propagación de la prefisura. Los valores de Duración son los más altos de todos los ensayos. En particular se puede observar varios eventos de muy gran Amplitud y Duración que coinciden con el momento de la relajación de tensiones, de modo que se puede suponer que corresponden a instantes de gran propagación de la prefisura.

#### **4.6 - Distribución de la Duración**

En otro trabajo ya publicado<sup>[4-3]</sup>, y comentado en la sección 1.4, se presentó un modelo matemático para la simulación de eventos de EA. Representando allí al sistema de detección con una adecuada ecuación diferencial lineal de cuarto orden, se obtuvo que, si al sistema ingresan impulsos tipo  $\delta(t)$ , con duración nula, a la salida se obtienen señales del tipo evento, caracterizados por sus parámetros Amplitud, Duración y Risetime, donde la Amplitud de las señales de EA resultaba proporcional a la amplitud de los impulsos de entrada. También se vio que si las amplitudes de los impulsos de entrada seguían una distribución Log-normal, las Amplitudes de los eventos de salida seguían la misma distribución. Más aún, las señales de salida resultaron similares a los eventos experimentales, incluso en sus parámetros Duración y Risetime. En el caso real, las señales que entran al transductor no son pulsos, pero de todos modos, el trabajo citado muestra que la influencia del sistema de detección sobre los parámetros Duración y Risetime, es complicada, y de ningún modo puede asumirse la proporcionalidad con los valores de los mismos que se obtienen a la salida del sistema de EA, como sí fue el caso para la Amplitud.

En la literatura publicada no hay antecedentes de ajuste de curvas de distribución para la Duración y el Risetime. Pero, dado que un aspecto importante de la descripción de una variable es la forma de su distribución, donde la estadística descriptiva simple, puede generalmente aportar algún tipo de información, se hizo el estudio de la distribución experimental de estos parámetros para todos los ensayos.

Tanto en el caso de la Duración como en con el Risetime, ninguna curva teórica sirvió para ajustar todos los ensayos. Debido a estas últimas razones, no se ha podido hallar aún una relación física entre las fuentes de EA y los valores experimentales de Duración y Risetime de las señales de EA obtenidos.

Se comenzó buscando la función de distribución que mejor ajustase los histogramas de los resultados experimentales. Para ver la bondad del ajuste, se usaron los tests de Kolmogorov y Pearson Chi-cuadrado (ver Apéndice), analizándose el valor-p calculado en cada test, comparado con el nivel de significación elegido,  $\alpha = 5\%$  (0.05). Así, el criterio de no rechazo de la hipótesis nula ( $H_0 =$  "la función propuesta ajusta los datos experimentales"), corresponde a un valor-p  $> 0.05$ , o a un resultado "n.s." que indica un valor "no significativo", es decir que no debe rechazarse la hipótesis  $H_0$ . Debe señalarse que para variables continuas, como en este caso, el test

de Pearson Chi-cuadrado es menos potente que el de Kolmogorov, porque es sensible al número de celdas o intervalos en que se divide el rango de valores.

Con excepción del ensayo AROF1 (tipo  $\gamma$ ), todos los histogramas de la Duración son asimétricos positivos, de modo que fueron comparados con las distribuciones Exponencial, Gamma, Chi-cuadrado y Log-normal, no encontrándose una única distribución que diera el mejor ajuste en todos los casos.

Teniendo en cuenta los estudios previos, los ensayos fueron analizados dentro de los distintos tipos. En los gráficos presentados en esta sección y las siguientes, se debe considerar la siguiente nomenclatura:

NT : número total de eventos del ensayo

N : cantidad de eventos considerados en el análisis

NC : número total de celdas o categorías del histograma.

La probeta AROF, tipo  $\gamma$ , pudo ser ajustada con una distribución de tipo Normal, siendo éste el único caso. En la figura 4.11 se muestra el gráfico correspondiente.

En los ensayos  $\alpha_1$  (probetas con adelgazamiento y con óxido), el mejor ajuste se logró con una curva de tipo Exponencial. Como ejemplo se muestra en la figura 4.12 el gráfico para el ensayo CEL16.

En el ensayo  $\beta_1$  (probeta CEL10, con muesca y con óxido), se obtuvo un histograma particular que se muestra en la figura 4.13, se ve allí que con ninguna de las distribuciones propuestas se lograría un buen ajuste ya que presenta tres máximos relativos. Se aplicó entonces la función Logaritmo neperiano al parámetro Duración, para aumentar las diferencias relativas, obteniéndose la distribución mostrada en la figura 4.14 donde se diferencian claramente dos subconjuntos de la población. Para cada subconjunto obtenido se buscó la función teórica correspondiente. Analizando los eventos con Duración  $< 100 \mu\text{s}$  ( $\text{Log}(100) = 4.6$ , ver figuras 4.13 y 4.14), el mejor ajuste se logró con una curva Exponencial, ver figura 4.15. Para la Duración  $> 100 \mu\text{s}$  el mejor ajuste se logró con la curva Log-normal, tal como se muestra en la figura 4.16.

Para los ensayos tipo  $\beta$  (probetas con muesca), en todos los casos se logró un buen ajuste con la función Exponencial, como ejemplo se muestra la figura 4.17 para la probeta CEL20.

En los ensayos  $\alpha$  se logró un buen ajuste con la función Exponencial, tal como se ve en la figura 4.18 para la probeta CEL12.

En la tabla 4-II de la próxima sección se resumen estos resultados.

#### **4.7 - Distribución del Risetime**

Como ya se mencionó en la sección anterior, en la literatura publicada, no se encontraron antecedentes del estudio de curvas de distribución para el Risetime.

Al igual que en el caso de la Duración, ninguna curva teórica sirvió para ajustar la totalidad de los ensayos, debiendo ser analizado el ajuste por tipo de ensayos.

Para el ensayo tipo  $\gamma$  (probeta AROF1), se acepta que la estadística seguida podría ser Normal (ver figura 4.19); los valores para el test de Kolmogorov-Smirnov ( $p =$  no significativo) y del Chi-cuadrado ( $p \cong 0.21$ ), confirman esta decisión aunque a simple vista el gráfico correspondiente podría sugerir alguna otra interpretación.

En los ensayos tipo  $\beta$ , se acepta que la estadística seguida por el Risetime es Exponencial, tal como se muestra en la figura 4.20 para el ensayo CEL11, excepto en el ensayo CEL20, donde se logró el mejor ajuste con una distribución Log-normal, teniendo en cuenta la indicación del test de Kolmogorov (ver figura 4.21), si bien el valor- $p$  dado por el test de Pearson es menor que 0.05.

En los ensayos tipo  $\alpha_1$  (con adelgazamiento y con óxido), debido al tipo de histograma que presentan (ver ejemplo del CEL16 en la figura 4.22), y teniendo en cuenta fundamentalmente el resultado del test de Kolmogorov, se acepta el ajuste con la función Log-normal.

Para los ensayos  $\alpha$ , se logró un buen ajuste con la función Exponencial como se ve en el ejemplo del CEL12 de la figura 4.23.

El ensayo  $\beta_1$  (CEL10) se presenta en la figura 4.24 lográndose un buen ajuste con la función Log-normal.

En la tabla 4-II se muestran los principales resultados para los ajustes de las curvas de frecuencia de los parámetros Duración y Risetime para cada ensayo, indicándose además el número de eventos totales (NT), número de eventos considerados (N) y el número de celdas consideradas en el histograma (NC).

*Tabla 4-II: Ajuste de las distribuciones de los parámetros Duración y Risetime.*

PARÁMETRO		DURACIÓN				RISETIME		
Tipo de Ensayo	Nombre	NT	Tipo de Ajuste	N	NC	Tipo de Ajuste	N	NC
$\alpha$	CEL12	27	Exponencial	27	9	Exponencial	27	9
$\alpha$	CEL13	26	Exponencial	26	7	Exponencial	26	6
$\alpha$	CEL14	21	Exponencial	21	7	Exponencial	21	6
$\alpha_1$	CEL15	141	Exponencial	141	15	Log-normal	141	18
$\alpha_1$	CEL16	242	Exponencial	242	19	Log-normal	242	15
$\alpha_1$	CEL17	332	Exponencial	332	15	Log-normal	332	18
$\beta$	CEL8	17	Exponencial	17	6	Exponencial	17	9
$\beta$	CEL9	34	Exponencial	34	9	Exponencial	34	9
$\beta$	CEL11	65	Exponencial	65	9	Exponencial	65	10
$\beta$	CEL20	133	Exponencial	133	15	Log-normal	133	15

$\beta_1$	CEL10	214	Exponencial	126	10	Log-normal	214	16
			si $D < 100\mu s$					
			Log-normal	84	14			
			si $D > 100\mu s$					
$\gamma$	AROF1	64	Normal	64	12	Normal	64	12

**Resumiendo:** la tabla 4-II expresa que los datos experimentales correspondientes a la Duración, podrían ser ajustados por una curva teórica de tipo Exponencial en los ensayos  $\alpha$ ,  $\alpha_1$ , y  $\beta$ , no siendo determinante la presencia del adelgazamiento, del óxido o de la muesca. La probeta CEL10 ( $\beta_1$ ), única con muesca y con óxido con un histograma de tipo bimodal, presenta una estadística algo diferente, ajustándose el histograma con una distribución tipo Exponencial para valores de Duración  $< 100 \mu s$  y Lognormal para el resto. En caso de la probeta AROF1 ( $\gamma$ ), se podría inferir que la presencia de la prefisura en la muesca, es en sí misma importante para diferenciar la distribución de la Duración. Teniendo en cuenta el ajuste de los histogramas del parámetro Duración, no habría diferencia entre los distintos tipos de probetas, excepto con el caso de tipo  $\beta_1$  de la probeta CEL10 y del tipo  $\gamma$  de la probeta AROF1.

Los datos del Risetime, de la tabla 4-II, muestran que no fue posible para todos los ensayos realizados, encontrar una única función de distribución para ajustar los histogramas experimentales. A pesar de esto, es significativa la similitud que presenta la forma de todos los histogramas, concentrándose los datos obtenidos en valores menores que  $50 \mu s$ , y pocos valores en la cola superior de la distribución. Esta regularidad no se cumple en el ensayo  $\gamma$  (probeta AROF1 con muesca y prefisura); en este caso la curva de mejor ajuste es la Normal. Los ensayos  $\alpha$  (probetas con adelgazamiento) y  $\beta$  (probetas con muesca), excepto el CEL20, presentan un ajuste de tipo Exponencial. Los ensayos  $\alpha_1$  (probetas con adelgazamiento y con óxido) y  $\beta_1$  (probeta con muesca y con óxido) presentan un ajuste aceptable con la distribución Log-normal. Podría asumirse que la presencia del óxido es fundamental para esta distribución. La probeta CEL20 del tipo  $\beta$  (probetas con muesca) también presenta el mejor ajuste con la distribución Log-normal, diferente al resto dentro de su grupo.

Por lo tanto se puede concluir que teniendo en cuenta el ajuste de los histogramas del parámetro Risetime, no habría diferencia entre las probetas con muesca y las que tienen adelgazamiento, pero sí entre estos dos grupos y las que presentan óxido ( $\alpha_1$  y  $\beta_1$ ).

#### **4.8 - Distribución de la Amplitud**

Al igual que con los otros dos parámetros, para todos los ensayos, se realizó luego el estudio estadístico de las distribuciones de la Amplitud. En todos los casos los

histogramas fueron asimétricos, con gran cantidad de eventos de baja Amplitud y algunos pocos eventos con valores grandes. Para cuantificar el apartamiento de la curva normal, se calculó el *coeficiente de asimetría* (momento de tercer orden) de la curva, que mide la desviación de la simetría, y el *coeficiente de aplanamiento* (momento de cuarto orden) de la curva, que mide cuán aguda es ésta (ver Apéndice).

El rango de asimetría calculado para todos los ensayos varió entre 1.04 y 2.7, y el coeficiente de aplanamiento fue de 1.0 a 8.1<sup>[4-1]</sup>. Estos datos demuestran que las funciones de distribución que ajustaran los histogramas debían buscarse entre funciones de distribuciones asimétricas positivas (hacia la derecha).

Tal como se vio en la sección 4.2, las etapas de crecimiento y decrecimiento de la Amplitud se van sucediendo a lo largo del tiempo. Este tipo de fenómeno puede ser explicado como una clara independencia del factor tiempo en la Amplitud. Además los histogramas de Amplitud son unimodales y asimétricos positivos, este tipo de asimetría indica que la media de la variable es mayor que la mediana, por lo tanto, la probabilidad de superar el valor medio es más baja que la de no superarlo. Esta propiedad explica que valores sucesivamente altos sean difíciles de alcanzar, pero una vez logrados vendrán probablemente sucedidos por valores más pequeños de la Amplitud y por consiguiente de una caída del pico de la distribución.

Como ya se mencionó, en la mayoría de los histogramas, se obtiene un pequeño número de eventos con grandes valores de Amplitud, insinuando la sospecha de una distribución con un segundo pico. Este hecho ya aparece citado en la literatura (Ref. [1-38] del Capítulo 1), para crecimiento de fractura dúctil. El primer grupo, de gran frecuencia de eventos de baja Amplitud se asocia con la formación de pequeñísimas fisuras submicroscópicas en la punta de la fisura primaria ( $\Delta A_I$  en la figura 1.23 del Capítulo 1), y el segundo grupo, pocos eventos de gran Amplitud, se correlaciona con la unión de estas pequeñas fisuras que hacen crecer la fisura primaria ( $\Delta A_{II}$  en la figura 1.23 del Capítulo 1).

En otro trabajo desarrollado en el Laboratorio de Ondas Elásticas, para el caso de vainas combustibles de Zircaloy-4<sup>[4-4]</sup>, también se evidenciaron dos picos, que fueron asociados con dos mecanismos diferentes de generación de EA, los eventos de poca Amplitud correspondientes a deformación plástica, y los de mayor Amplitud a decohesión, fractura de precipitados y propagación de fisura.

En el presente caso de estudio, debido a las características del material ensayado, se pueden aceptar las mismas hipótesis. Nakamura<sup>[4-5]</sup> también señala una distribución bimodal para un ensayo uniaxial en acero con probetas compactas.

Pese a las consideraciones anteriores, es necesario puntualizar que para el estudio estadístico de la Amplitud, la cantidad de eventos con valores altos, es un pequeñísimo porcentaje del total, de modo que su significación estadística es muy baja, por lo tanto todas las distribuciones fueron consideradas como unimodales en las próximas secciones, y fueron analizadas con una única distribución.

#### 4.8.1 - Ley potencial



Varios autores<sup>[4-5, 4-6, 4-7, 4-8]</sup>, encontraron que al graficar las distribuciones experimentales de la Amplitud en ejes logarítmicos, correspondían a líneas rectas de pendientes negativas, de acuerdo a la expresión de una ley de distribución potencial:

$$n(V) = \left(\frac{V}{V_0}\right)^{-b} \quad (4.1)$$

donde  $n(V)$  es la fracción de eventos de EA cuya Amplitud es mayor que  $V$ , y  $V_0$  es la menor amplitud detectable. Este modelo de ley potencial fue inicialmente empleado en sismología. El valor  $b$  no depende de la ganancia ni de la atenuación, debido a que su valor no cambia si se reducen o aumentan las amplitudes de todos los eventos por el mismo factor, tampoco depende de la velocidad de deformación. No obstante su validez no es universal, ya que sí depende de las propiedades del material, siendo su valor más alto para deformación plástica, y más bajo para propagación de fisuras, dentro del mismo ensayo. En distintos materiales, los valores  $b$  calculados experimentalmente por varios autores<sup>[4-8]</sup>, medidos para una variedad de materiales y mecanismos de deformación, corresponden al rango entre 0.4 y 4.0. Los valores más bajos se encontraron en procesos discontinuos de crecimiento de fisuras en materiales de alta resistencia (metales frágiles), mientras que el crecimiento de la zona plástica previo a la extensión de la fisura, produce valores de  $b$  relativamente altos. El valor  $b$  puede cambiar durante el mismo ensayo, reflejando por ejemplo una transición desde deformación plástica a extensión subcrítica de una fisura dentro del mismo material.

Para cada uno de los 12 ensayos analizados en esta Tesis, se calculó después de haber hecho los correspondientes gráficos doble logarítmicos, el valor  $b$ . Estos variaron desde 0.63 hasta 3.07, verificándose que estaban comprendidos en los valores típicos de la literatura.

Dado que debido al tipo de ensayos realizados, no se podía separar las etapas en que se producía deformación plástica, de las que correspondían a la propagación de fisuras o microfisuras, ya que ambas sucedían simultáneamente, no se pudo avanzar más en el estudio de los valores  $b$ .

#### 4.8.2 - Estudio de la distribución Log-normal

Hay varios antecedentes del uso de funciones de distribución asimétricas para el ajuste de histogramas de la Amplitud de señales de EA. Pollock<sup>[4-8]</sup>, habla sobre la distribución Log-normal, relacionándola con la distribución del tamaño de las partículas de perlita en aceros. Ono et al.<sup>[4-9]</sup>, describen la distribución de Amplitudes con la función de Weibull, relacionándola con la misma distribución para el tamaño de las inclusiones de MnS en el acero, asumiendo que la EA detectada se debe a la decohesión de estas partículas. En su caso, las probetas eran cilíndricas, y con casi el doble de composición de Mn comparada con los datos de la tabla 3-II para estos ensayos, y fueron sometidas a ensayos de tracción uniaxiales. Probablemente, el

efecto del mayor contenido de Mn, hizo que la decohesión de las inclusiones fuera la causa más importante de la EA comparada con la deformación. Erlenkämper<sup>[4-10]</sup> señala que las aleaciones de Al siguen una distribución de Amplitud del tipo Log-normal.

Teniendo en cuenta estos antecedentes y lo expuesto en secciones anteriores, para los datos experimentales de las Amplitudes de los 12 ensayos estudiados, se probaron varias funciones de distribución asimétricas: Exponencial, Chi-cuadrado, Weibull y Log-normal.

Al igual que en las otras secciones, para ver la bondad del ajuste, se usaron los tests de Kolmogorov y Pearson Chi-cuadrado, analizándose el *valor-p* calculado en cada test, comparado con el nivel de significación elegido,  $\alpha = 5\%$  (0.05). Como ya se señaló, para variables continuas, el test de Pearson Chi-cuadrado es menos potente que el de Kolmogorov, porque es sensible al número de celdas o intervalos en que se divide el rango de los valores. En todos los casos, no se rechaza el ajuste, teniendo en cuenta sobre todo los tests de Kolmogorov.

Para los 12 ensayos se obtuvo el mejor ajuste, con la función de distribución Log-normal. En las figuras 4.25, para cada ensayo, se muestran los histogramas de Amplitud y la función de distribución Log-normal que mejor los ajusta. La nomenclatura usada se indica a continuación:

NT = número total de eventos, N = número de eventos considerados en el histograma, NC = número de celdas en que se dividió el rango de los datos, VM = valor medio de la curva teórica, V = varianza de la curva teórica, df = grados de libertad.

Viendo la coincidencia del mejor ajuste con la función Log-normal, se trató luego de encontrar alguna causa física que explicara este hecho. Se comenzó entonces por analizar la influencia del sistema de detección.

#### 4.8.2.1 - Influencia del sistema de detección

Como ya se ha indicado, la Amplitud es el único parámetro que es independiente del umbral de detección elegido, de modo que siempre se la ha considerado como el parámetro mejor relacionado con las características de las fuentes productoras de la EA.

La influencia en la medición de la Amplitud de las señales de EA, se restringe al transductor y al sistema de amplificación. Como es sabido, los amplificadores mantienen la relación lineal entre la amplitud de la señal de entrada y la de salida, por lo tanto se analizará aquí solamente la influencia del transductor.

Los "eventos" de EA son la respuesta  $r(t)$  del transductor, al pulso de excitación mecánica  $s(t)$  que arriba al transductor y que proviene de la energía de deformación elástica acumulada. Siguiendo el desarrollo planteado por Ono<sup>[4-9]</sup>, se puede suponer para el caso más simple, que los pulsos que ingresan al detector son rectangulares y de amplitud  $S$  y duración  $T$ :

$$s(t) = S [u(t) - u(t - T)] \quad (4.2)$$

donde  $u(t)$  es la función escalón unitaria.

La respuesta  $r(t)$  del transductor al estímulo, será la convolución de  $s(t)$  con la respuesta  $v(t)$  del transductor a un impulso mecánico tipo  $\delta(t)$ , es decir con la Función de Green del transductor, así:

$$r(t) = \int_{-\infty}^{\infty} s(\lambda) v(t - \lambda) d\lambda = s(t) * v(t) \quad (4.3)$$

Es necesario aquí, estudiar las dos posibilidades de un transductor piezoeléctrico de EA: (a) transductor resonante, y (b) transductor de banda ancha.

#### a) Transductor resonante:

Para un transductor resonante amortiguado con frecuencia de resonancia  $\omega_0$  y constante de amortiguación  $\beta$ , vale:

$$v(t) = e^{-\beta t} e^{i \omega_0 t} u(t) \quad (4.4)$$

de donde se obtienen para  $r(t)$  las soluciones:

$$r(t) = \frac{S (e^{\beta T - i \omega_0 T} - 1)}{\beta - i \omega_0} e^{-\beta t + i \omega_0 t} \quad (4.5)$$

para  $t > T$ .

Desarrollando en serie de Taylor, para  $t > T$ , es decir, justo cuando termina el impulso de entrada, y  $\beta T \ll 1$ , resulta que el valor máximo de  $r(t)$  es proporcional a  $S$ , poniendo en evidencia la linealidad de la respuesta del transductor con respecto a la amplitud de la excitación mecánica que recibe.

#### b) Transductor de banda ancha:

Dado que el sensor que recibe la EA analizada en estos ensayos, es de banda ancha, se estudia aquí este tipo de sensor. Un transductor de banda ancha, considerado como un filtro pasa bajo, con frecuencia de corte  $\omega_c$ , tiene una función de transferencia:

$$H(\omega) = \begin{cases} e^{-i\omega t_0} & \text{para } |\omega| < \omega_c \\ 0 & \text{para } |\omega| > \omega_c \end{cases} \quad (4.6)$$

donde  $t_0$  es un tiempo inicial arbitrario<sup>[4-11, 4-12, 4-13]</sup>.

Al hacer la Transformada de Fourier de (4.3) se obtiene:

$$F[r(t)] = F[s(t)] \times F[v(t)] = F[s(t)] \times H(\omega) \quad (4.7)$$

donde  $F$  representa la Transformada de Fourier, y  $F[v(t)] = H(\omega)$ .

Usando para  $s(t)$  la expresión (4.2) se obtiene:

$$F[r(t)] = H(\omega) S \int_0^T \exp(-i\omega t) dt = g(\omega) \quad (4.8)$$

Aplicando la Antitransformada de Fourier:

$$r(t) = F^{-1}[g(\omega)] \quad (4.9)$$

Para poder resolver la ecuación (4.9) es necesario hacer un desarrollo en serie de Taylor de la exponencial. Asumiendo por simplicidad:  $t_0 = 0$  y  $(t - T) \ll \frac{1}{\omega_c}$ , se obtiene:

$$r(t) = \frac{S\omega_c T}{\pi} \quad (4.10)$$

Por lo tanto, otra vez, la Amplitud de la respuesta del transductor resulta proporcional a la amplitud ( $S$ ) de la señal mecánica de entrada.

Este resultado, que se repite en ambos tipos de transductores es muy importante, pues la proporcionalidad entre la amplitud del impulso mecánico de entrada ( $S$ ), y el máximo de la señal eléctrica de salida ( $A$ ), es decir, la Amplitud de la señal de EA, permite inferir que la distribución estadística de ambos parámetros sería la misma.

De aquí en adelante, se asumirá la proporcionalidad entre la amplitud del impulso mecánico de entrada al transductor, y la Amplitud de la señal de EA.

#### 4.8.2.2 - Interpretación de los resultados

Un modelo muy usado en ciencia aplicada es la distribución Log-normal, ya que es asimétrica positiva y se aplica a variables estocásticas positivas. En ciertas situaciones, el modelo Log-normal puede ser postulado sobre la base de consideraciones a priori. Supóngase que la característica medible de una "caja negra" es el resultado de causas que en sí mismas no pueden ser medidas. Si:

(i) la característica medible es el *efecto multiplicativo* de causas subyacentes, es decir, el daño incremental entre dos etapas del proceso, es una pequeña proporción aleatoria del daño total existente en la etapa previa,

(i) las causas son *variables independientes* aleatorias, y

(ii) hay un *gran número* de causas,

entonces se puede aplicar el Teorema Central del Límite (TCL)<sup>[4-14]</sup>.

En un material, el número, tamaño y ubicación espacial de los defectos estructurales (discontinuidades en la red cristalina causadas por vacancias, intersticiales, bordes de grano, dislocaciones, etc.), tienden a estar distribuidos aleatoriamente en cualquier unidad de volumen. Por lo tanto, las propiedades del material sensibles a la estructura, tienden a ser variables aleatorias con dispersión inherente bastante significativa. Estas propiedades del material pueden por consiguiente, ser descritas estadísticamente.

Establecer un modelo estadístico del fenómeno de la deformación y fractura, es difícil debido a que los procesos tales como deformación plástica, y formación y propagación de fisuras: (a) involucran interacciones complejas, y (b) constituyen procesos irreversibles. Por estas propiedades sensibles a la estructura, los elementos primarios que conducen a los cambios estructurales del material son básicamente defectos microscópicos y submicroscópicos del material. Una vez que estos defectos han conseguido un cierto tamaño (o espaciamiento) umbral, se produce el proceso en cuestión, y sus efectos eventualmente se convierten en medibles. Los cambios físicos correspondientes involucran cambios atómicos de una configuración estable a otra, a través de barreras de energía. Las manifestaciones observables de este proceso incluyen deformación plástica, y creación y propagación de fisuras y microfisuras.

La propagación de una fisura en un medio, disminuye las tensiones en las superficies de fractura, pero la aumenta radicalmente a corta distancia de la fisura. Esta reconfiguración del campo de tensiones, representa una transición a un estado de menor energía, siendo la energía liberada igual a la diferencia entre los dos estados de energía. El reajuste del campo de tensiones lo inhomogeniza, pudiendo producir que otras zonas sean elevadas a condiciones críticas para producir fenómenos como el trabado y destrabado de dislocaciones, creación o aniquilación de dislocaciones, o creación y propagación de fisuras. Así los sistemas de fisuras y redistribuciones de tensiones (deformaciones), dan la impresión de un sistema interactivo que tiene el sello de realizar una auto-organización debido a las interacciones no lineales entre los elementos inhomogéneos que los forman. En este sentido se puede decir que los fenómenos de deformación y propagación de fisuras están relacionados con los nuevos conceptos de *criticalidad auto-organizada*<sup>[4-15]</sup> que pretenden describir sistemas similares. Así, la organización espacial es muy común en la naturaleza, como se ejemplifica con los muchos sistemas que muestran un comportamiento *fractal*.

Otro aspecto muy interesante es la relación de las señales de EA con el ruido  $1/f$ . Se llama *ruido  $1/f$*  al comportamiento que muestran muchos sistemas cuando al representar en un gráfico doble logarítmico, la densidad espectral de potencia en función de la frecuencia ( $f$ ), para un análisis de Fourier, se obtiene una recta de pendiente  $\beta$  negativa, resultando la densidad espectral proporcional a  $1/f^\beta$ .

El ruido  $1/f$  aparece en numerosos y diversos fenómenos de la naturaleza donde la aleatoriedad juega un rol importante. Este ruido se hace presente tanto en el análisis de diversas señales temporales (latido cardíaco, fluctuaciones de resistencia en

semiconductores, relojes de arena, flujo de las corrientes oceánicas, ruido sísmico, actividad solar, oscilaciones del eje terrestre, etc.), como en disposiciones espaciales (dendritas, líneas de costa y de paisaje, cuerdas cósmicas). No existe aún una teoría general que explique estas leyes, sin embargo se demuestra que los sistemas dinámicos que presentan un gran número de grados de libertad evolucionan naturalmente hacia estructuras críticas auto-organizadas, que tienen un cierto grado de estabilidad.

En un trabajo desarrollado en el Laboratorio de Ondas Elásticas, se estudiaron las muestras secuenciales digitalizadas de señales de EA a partir de un ensayo de abrasión de un recubrimiento de TiN sobre acero inoxidable<sup>[4-16]</sup>. Al hacer el espectro de potencia de dichas señales, no sólo se observó la presencia del ruido  $1/f^\beta$ , sino que los valores encontrados del exponente  $\beta$ , permitieron identificar distintas etapas del ensayo.

Por otro lado, la organización temporal es necesaria para el *ruido*  $1/f$ , como sucede en el flujo de arena en un reloj de arena, o analizando el flujo de los ríos. Es muy probable que exista una relación entre la correlación temporal y espacial de estos fenómenos, así nació la llamada criticalidad auto-organizada.

Como avance de trabajos que actualmente se están desarrollando en el laboratorio de Ondas Elásticas, se puede decir que al hacer los primeros análisis con los eventos digitalizados en este Trabajo, se comprobó para la densidad espectral el comportamiento  $1/f^\beta$ , con  $\beta = 1.3 \pm 0.3$ .

Los procesos que producen deformación (creación, trabado y movimiento de dislocaciones, deslizamiento, etc.) y la formación y propagación de fisuras, son extremadamente sensibles a cualquier heterogeneidad presente en el medio, es decir están relacionadas de alguna manera con el desorden.

En la física estadística han surgido últimamente una serie de nuevos conceptos relacionados con los sistemas desordenados, tales como los ya mencionados: *fractales*, *sistemas críticamente auto-organizados* o *criticalidad auto-organizada* y *ruido*  $1/f$ . Muchos de estos modelos, bastante simplificados y adaptados, sirvieron a la introducción teórica y numérica de fenómenos complejos, pero la aplicación exacta al mundo real es escasa, no obstante, bien pueden ser extendida a los fenómenos aquí involucrados. Debido a estos hechos, la física mecánica y la física estadística convergen en el problema de la deformación y fractura y el desorden, compartiendo sus conocimientos, problemas y herramientas.

Como ya se dijo, el número y la localización de defectos en un sólido están estadísticamente distribuidos, y los valores umbrales de su tamaño y espaciamiento para la formación de fisuras o el movimiento de las dislocaciones que puedan estar trabadas en los defectos, dependen del material. El medio ambiente (principalmente las tensiones y la temperatura) determina la energía disponible. De todo lo expuesto, queda claro que los procesos de deformación subyacentes son difíciles de demostrar experimentalmente, y queda claro también, que las tensiones pueden considerarse como variables aleatorias.

Más aún, ya que los procesos son irreversibles, sus estados son función del tiempo. Por lo tanto, los modelos estadísticos de las propiedades de los materiales deberían basarse en una teoría de procesos estocásticos en el *tiempo* y el *espacio*, relacionando las condiciones externas con los cambios atómicos y moleculares del sólido. Esta tarea no se ha logrado aún. Por el contrario las teorías estadísticas de la

resistencia de materiales generalmente son sólo formales. Es decir están basadas en suposiciones formales acerca del comportamiento macroscópico del material<sup>[4-14]</sup>.

Una fisura o fractura, en términos crudos, puede considerarse como la generación de una interfaz en un medio donde eventualmente algún tipo de desorden está presente.

Como ya se mencionó, tanto el avance de una fisura como el proceso de deformación de los materiales son fenómenos complejos, debidos a múltiples causas. En el caso de avance de una fisura, por ejemplo, ocurre que en la punta de la misma se va configurando una distribución aleatoria de tensiones ( $\xi_i$ ) y deformaciones ( $s_i$ ), y cuando en algún punto y en alguna dirección, se supera cierto valor umbral de dichas variables, la fisura avanza<sup>[4-11, 4-12, 4-13]</sup>.

Para decidir las condiciones que llevan a que una dada función aleatoria, pueda ser descripta por una función de distribución Log-normal o Normal, se aplica aquí el análisis que Cramer<sup>[4-17]</sup> realizó para problemas biológicos en el caso del crecimiento de un determinado órgano.

Por ejemplo, considérese una función  $s(\xi_1, \dots, \xi_n)$  que representa la amplitud de la *deformación porcentual* en un punto del material, proyectada sobre una dirección determinada. El conjunto  $(\xi_1, \dots, \xi_n)$  corresponde a  $n$  variables aleatorias independientes, que representan las *tensiones* producidas por distintas fuentes (borde de grano, dislocaciones en distintas direcciones, presencia de precipitados, átomos sustitucionales, fallas de apilamiento, maclas, etc.), y  $n$  es un número muy grande. Si  $s$  tiene derivadas primeras y segundas continuas en un entorno de  $(m_1, \dots, m_n)$ , siendo  $m_i$  el valor medio de la variable  $\xi_i$ , se puede escribir, de acuerdo al desarrollo de Taylor:

$$s(\xi_1, \dots, \xi_n) = s(m_1, \dots, m_n) + \sum_1^n c_i (\xi_i - m_i) + R \quad (4.11)$$

donde  $c_i$  es el valor de  $\frac{\partial s}{\partial \xi_i}$  en el punto  $(m_1, \dots, m_n)$ , mientras que el resto  $R$

contiene derivadas de segundo orden o mayor. El primer término del segundo miembro es una constante, en tanto que el segundo es la suma de  $n$  variables aleatorias independientes, cada una de ellas de media cero. Por el TCL, en condiciones generales (i, ii y iii), la suma de los dos primeros términos es asintóticamente Normal, con media igual al primer término. En muchos casos importantes se demuestra que  $R$  no tiene influencia en la distribución, resultando así para  $s(\xi_1, \dots, \xi_n)$  una distribución aproximadamente Normal, es decir, simétrica.

El TCL puede extenderse a otros casos. Si las causas, que originan un valor dado de  $s$ , no actúan por simple adición sino que están secuencialmente encadenadas, podrían dar lugar a una distribución asimétrica.

Supóngase que las  $n$  *tensiones*,  $(\xi_1, \dots, \xi_n)$ , actúan en el orden que indican sus subíndices ( $i$  se puede considerar como un instante determinado), y se designa como  $s_i$  a la *deformación porcentual* total producida por el conjunto de tensiones,  $(\xi_1, \dots, \xi_i)$ . Además, se puede suponer que la deformación adicional

producida por la tensión siguiente,  $\xi_{i+1}$  es proporcional a  $\xi_{i+1}$  y a una cierta función  $h(s_i)$  de la deformación alcanzada hasta el instante previo, resultando entonces:

$$s_{i+1} = s_i + \xi_{i+1} h(s_i) \quad (4.12)$$

de donde:

$$\xi_1 + \dots + \xi_n = \sum_{i=0}^{n-1} \frac{s_{i+1} - s_i}{h(s_i)} \quad (4.13)$$

Si cada tensión da lugar a una pequeña contribución de la deformación total, se puede pasar al continuo, reemplazando la suma por una integral:

$$\xi_1 + \dots + \xi_n = \int_{s_0}^s \frac{dz}{h(z)} \quad (4.14)$$

en donde  $z$  es la variable de integración y  $s = s_n$  representa la deformación total.

Dado que por hipótesis,  $\xi_1, \dots, \xi_n$ , son variables independientes y  $n$  es un número grande, se deduce que la función de la variable aleatoria  $s$ , que aparece en el segundo miembro, sigue una distribución Normal. Si se plantea el caso más sencillo,  $h(z) = z$ , es decir, que el incremento de deformación sea proporcional a la deformación previa, será:

$$s_{i+1} = s_i + \xi_{i+1} s_i \quad (4.15)$$

de donde se obtiene:

$$\xi_{i+1} = \frac{s_{i+1} - s_i}{s_i} \quad (4.16)$$

Por lo tanto al sumar todas las tensiones sobre ese punto, se llega a:

$$\xi_1 + \dots + \xi_n = \int_{s_0}^s \frac{dz}{z} = \ln \left( \frac{s}{s_0} \right) \quad (4.17)$$

Si con mayor generalidad, se considera un valor de deformación inicial  $a$ , usando  $\ln(s - a)$  en vez de  $\ln(s)$ , y tomando  $s_0 = 1$ , es decir, midiendo la deformación en unidades de  $s_0$ , se concluye que  $\ln(s-a)$ , sigue una distribución Normal, con parámetros  $m$  y  $\sigma$ , por lo tanto resulta:



$$g_{m,\sigma}(\ln(s-a)) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{(\ln(s-a)-m)^2}{2\sigma^2}\right) \quad (4.18)$$

válida para  $s > a$ , en tanto que  $g = 0$  para  $s < a$ .

Se cumple entonces que la variable  $s$  (amplitud de la deformación), tiene la función de distribución Log-normal:

$$f_{m,\sigma}(s) = \frac{1}{\sigma(s-a)\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{(\ln(s-a)-m)^2}{2\sigma^2}\right) \quad (4.19)$$

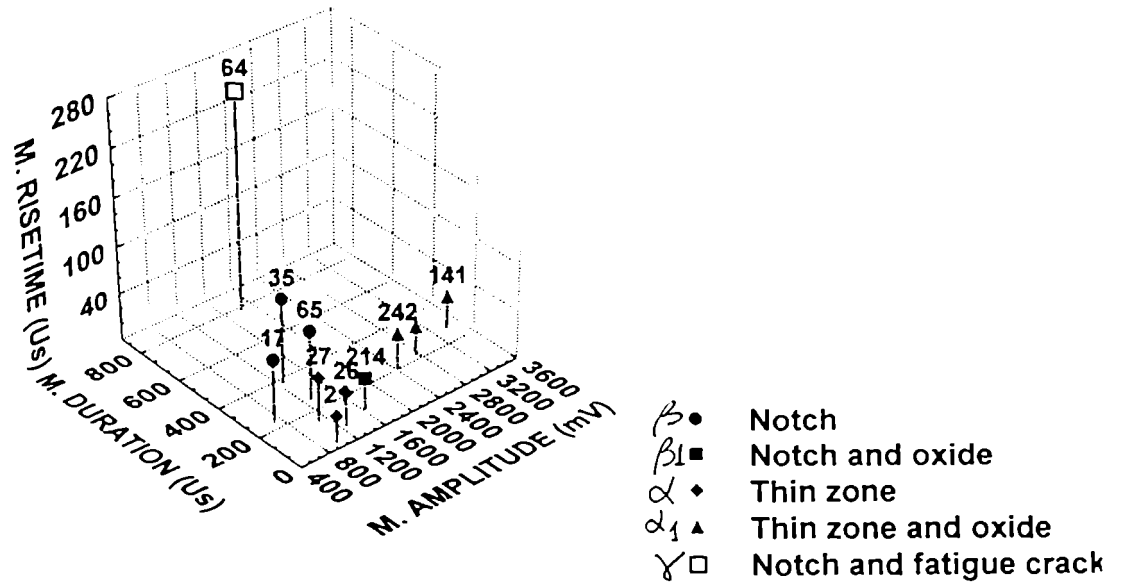
Como ya se dijo, el parámetro  $a$  representa el corrimiento de la curva sobre el eje de abscisas, o sea el valor inicial de la deformación. El parámetro  $m$  representa el promedio aritmético de la variable  $\ln(s-a)$ , y  $\sigma$  es la desviación estándar.

**Resumiendo:** las amplitudes de los pulsos de deformación mecánica ( $s_i$ ) que llegan al transductor, tienen una distribución Log-normal.

Teniendo en cuenta la discusión de la sección anterior, respecto a la linealidad entre la deformación mecánica de entrada al sensor y la amplitud de la señal eléctrica de salida, se concluye que también la distribución de Amplitud de los eventos de EA será de tipo Log-normal.

En este resultado, explicado matemáticamente, subyacen las explicaciones físicas ya mencionadas: las señales de EA detectadas, son el resultado complejo de un gran número de fuentes aleatorias independientes, pero cuyos efectos individuales están conectados, además, los fenómenos de movimiento de dislocaciones y propagación de fisuras, presentes en distintas proporciones en todos los ensayos, tienen el mismo comportamiento desde el punto de vista estadístico.

3D Scatterplot (11 tests)  
Amplitude, Duration and Risetime Mean Values



**Figura 4.1:** Representación tridimensional de los valores medios de Amplitud, Duración y Risetime, con el número total de eventos (Ref. [4-1]).

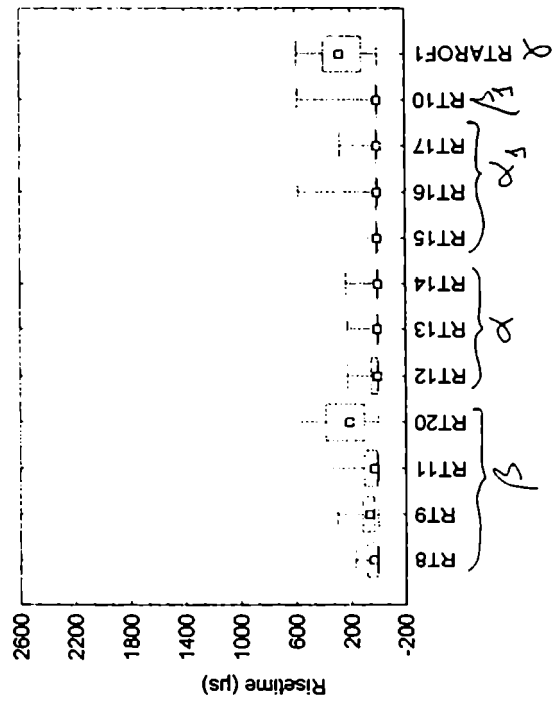
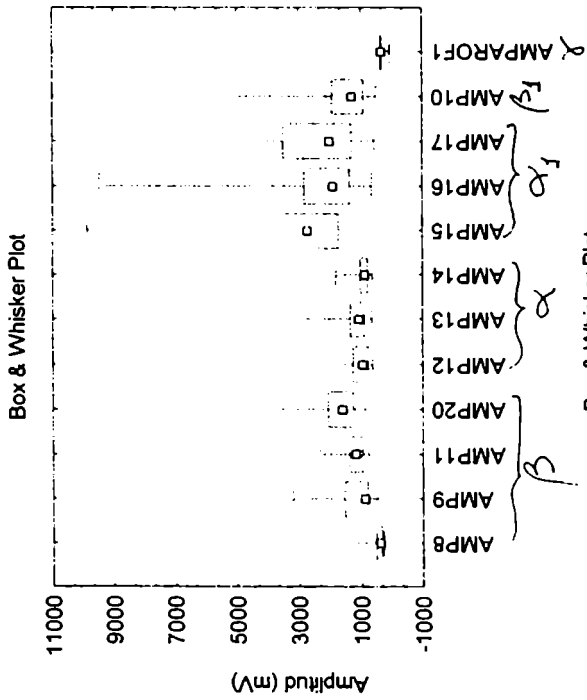
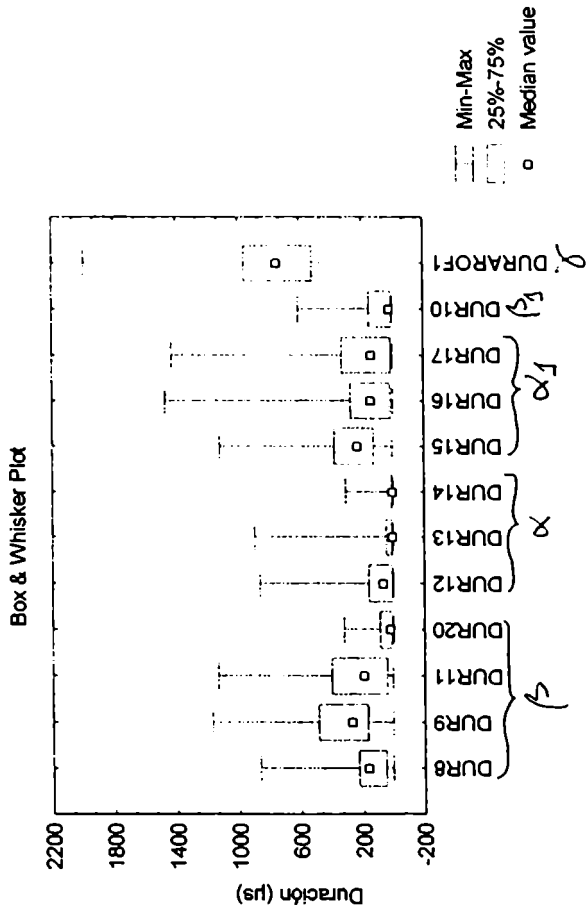
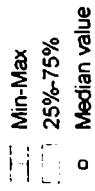
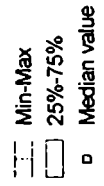


Figura 4.2: Rangos de variación y valores medios de Amplitud, Duración y Risetime para todos los ensayos.



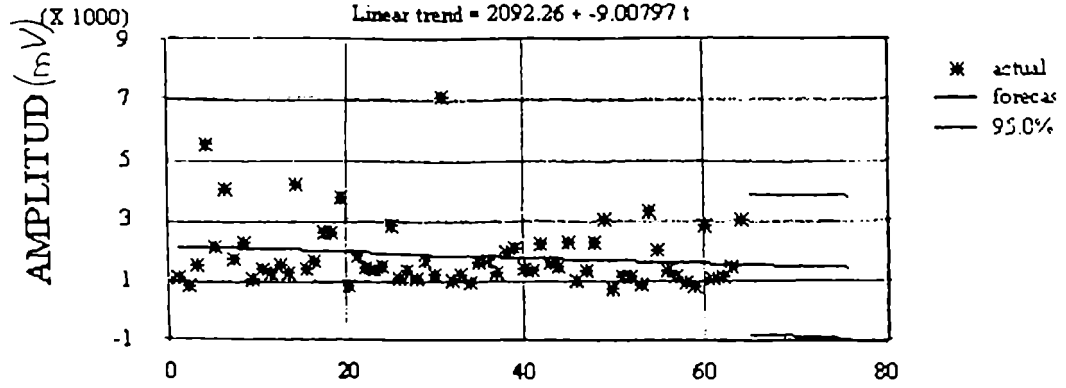


Figura 4.3: Tendencia lineal de la Amplitud en función del número de evento (ensayo AROF1), (Ref. [4-2]).

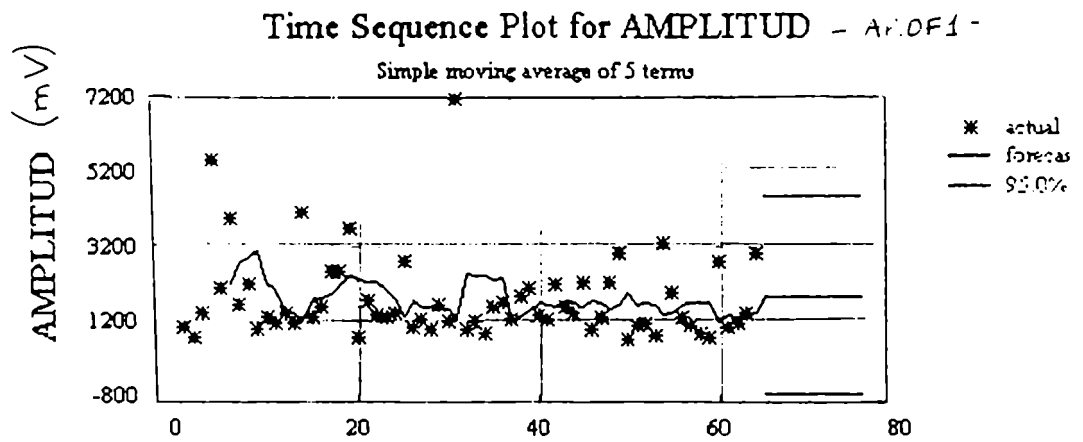


Figura 4.4: Tendencia de la Amplitud en función del número de evento por el método de las medias móviles (ensayo AROF1), (Ref. [4-2]).

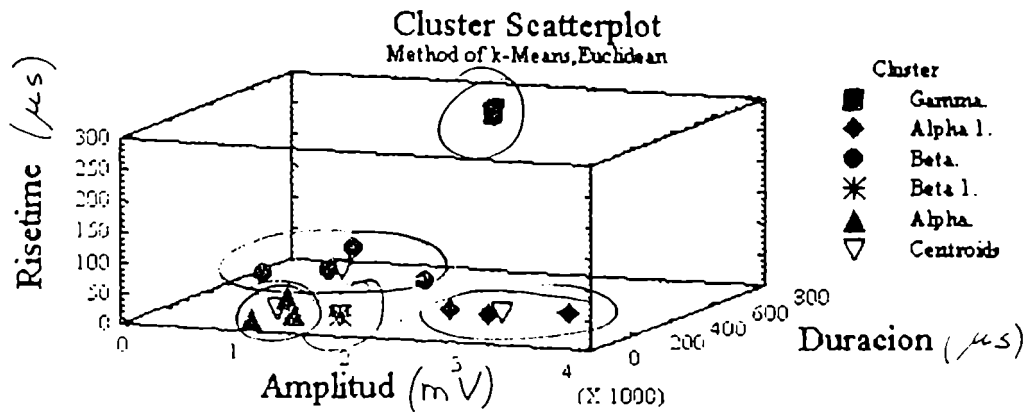


Figura 4.5: Agrupación en "clusters" de los valores medios de todos los ensayos (Ref. [4-2]).

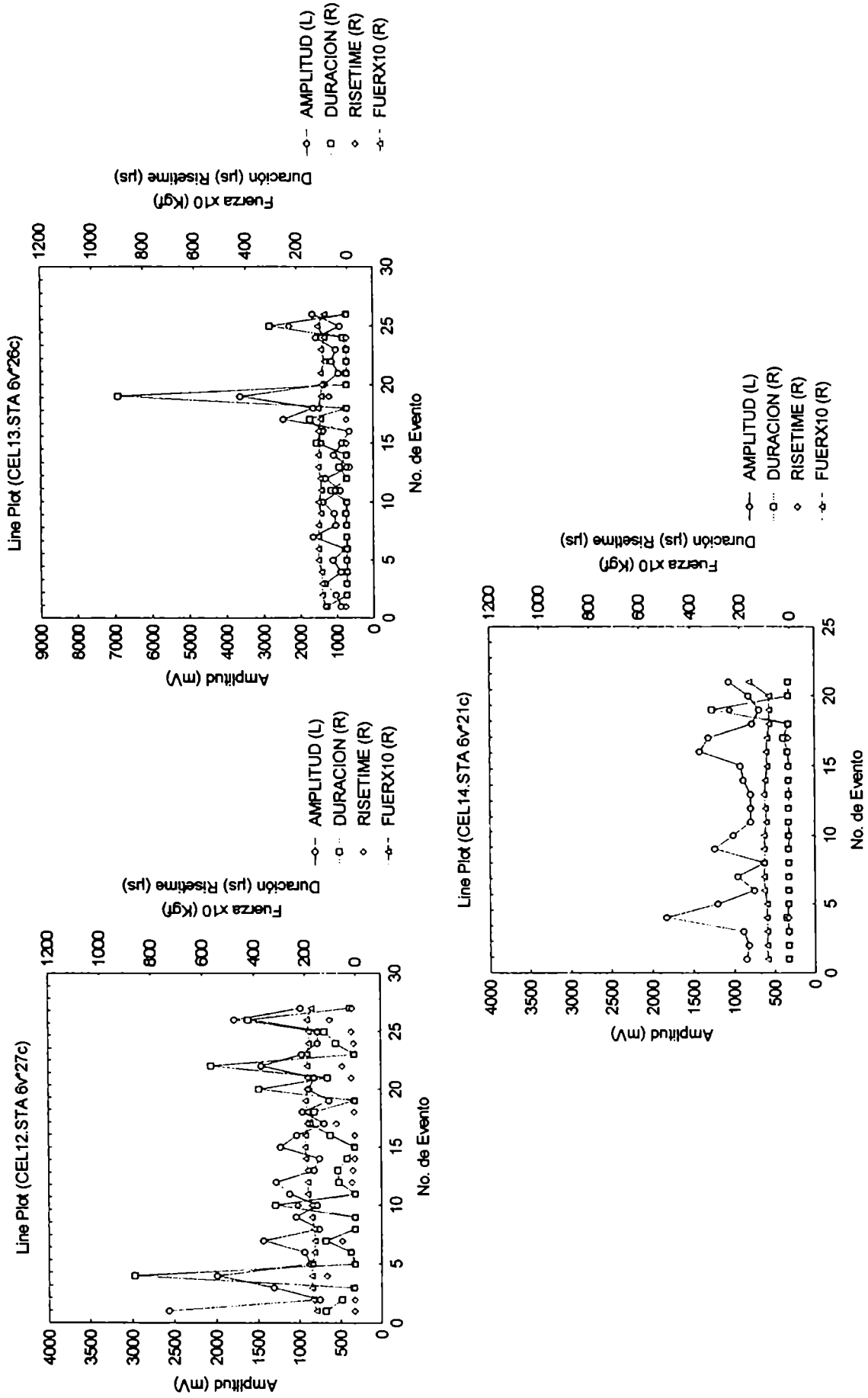


Figura 4.6: Fuerza, Amplitud, Duración y Risetime en función del número de evento para los ensayos tipo  $\alpha$  (CEL12, CEL13, CEL14).

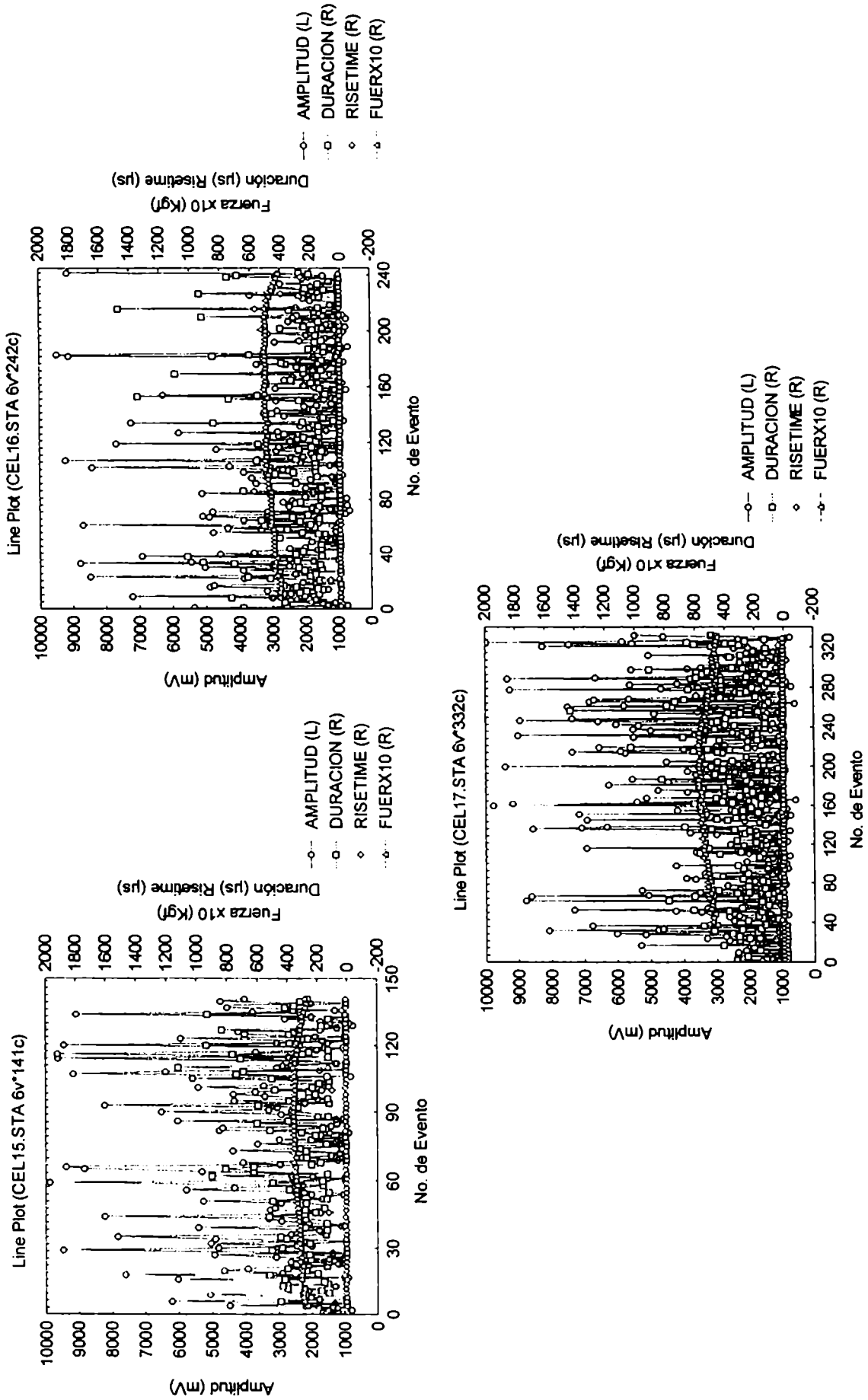


Figura 4.7: Fuerza, Amplitud, Duración y Risetime en función del número de evento para los ensayos tipo  $\alpha_1$  (CEL15, CEL16, CEL17).

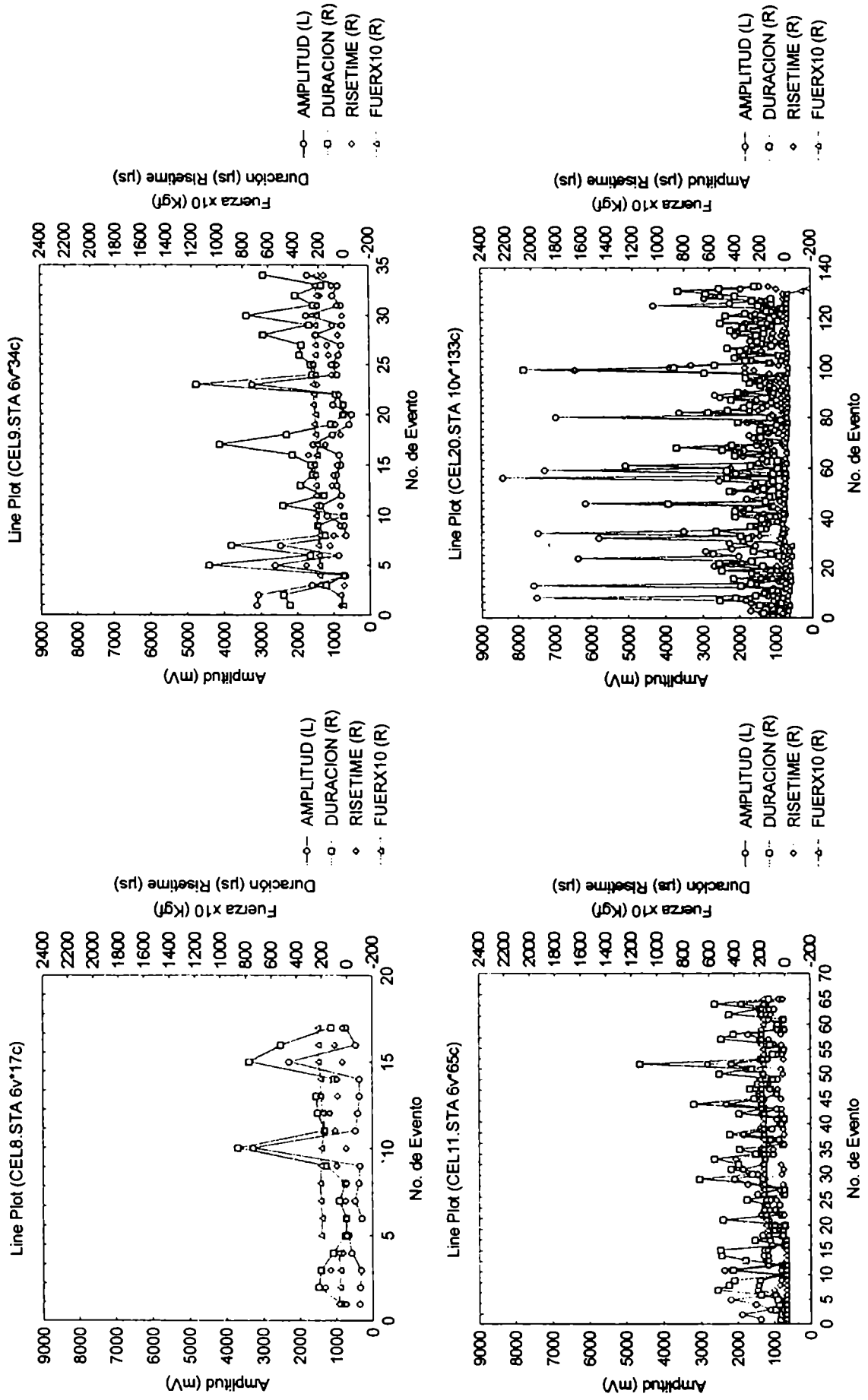


Figura 4.8: Fuerza, Amplitud, Duración y Rise Time en función del número de evento para los ensayos tipo  $\beta$  (CEL8, CEL9, CEL11, CEL20).

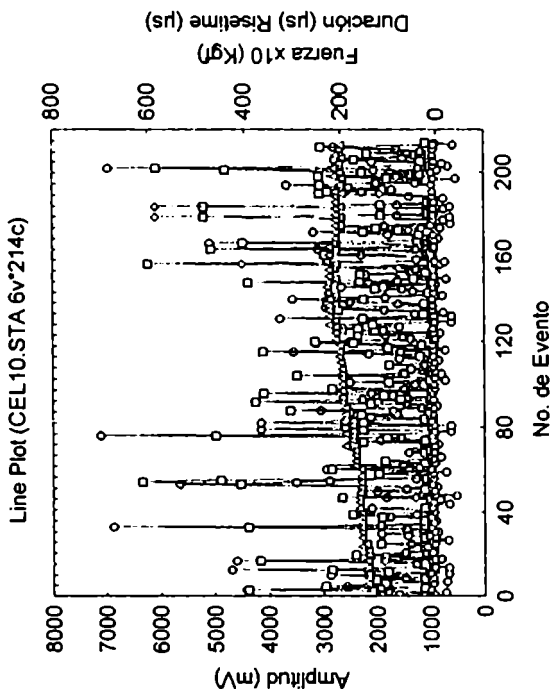


Figura 4.9: Fuerza, Amplitud, Duración y Risetime en función del número de evento para los ensayos tipo  $\beta_1$  (CEL10).

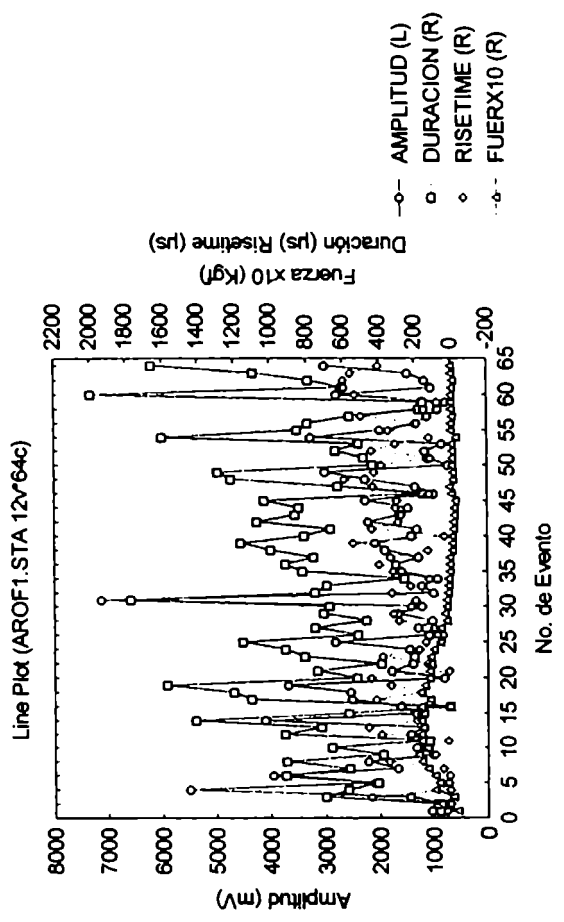


Figura 4.10: Fuerza, Amplitud, Duración y Risetime en función del número de evento para los ensayos tipo  $\gamma$  (AROF1).



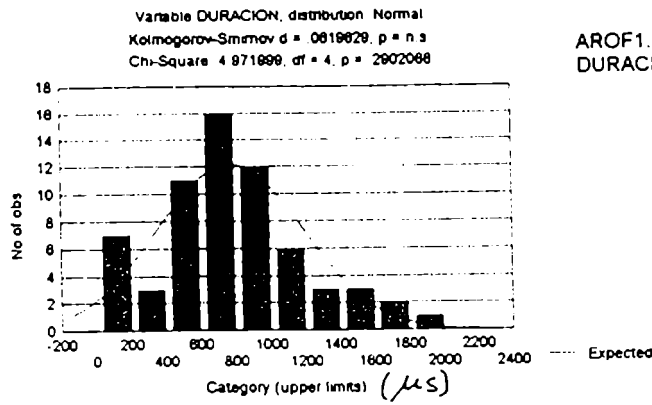


Figura 4.11: Distribución de la Duración, ensayo tipo  $\gamma$ , AROF1.

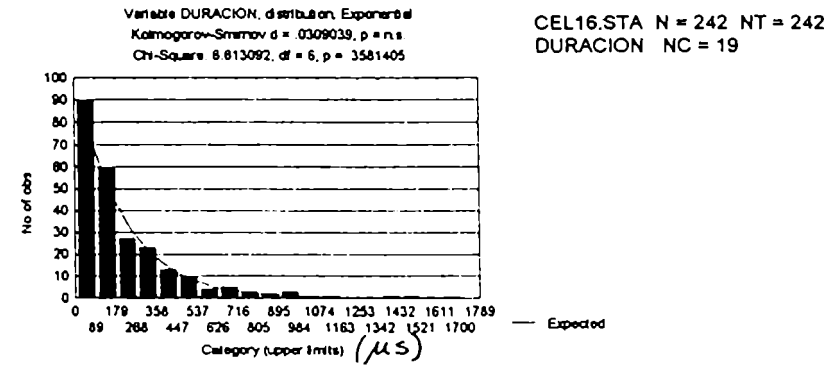


Figura 4.12: Distribución de la Duración, ensayo tipo  $\alpha_1$ , CEL16.

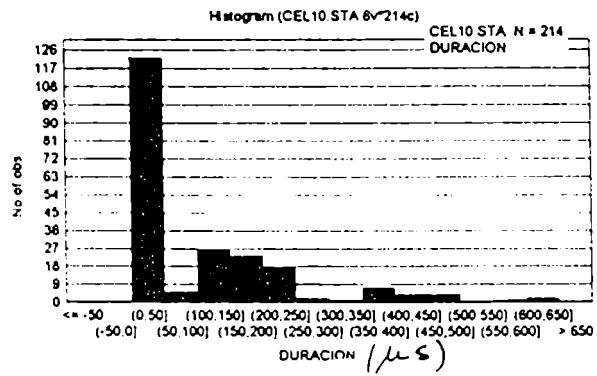


Figura 4.13: Distribución de la Duración, ensayo tipo  $\beta_1$ , CEL10.

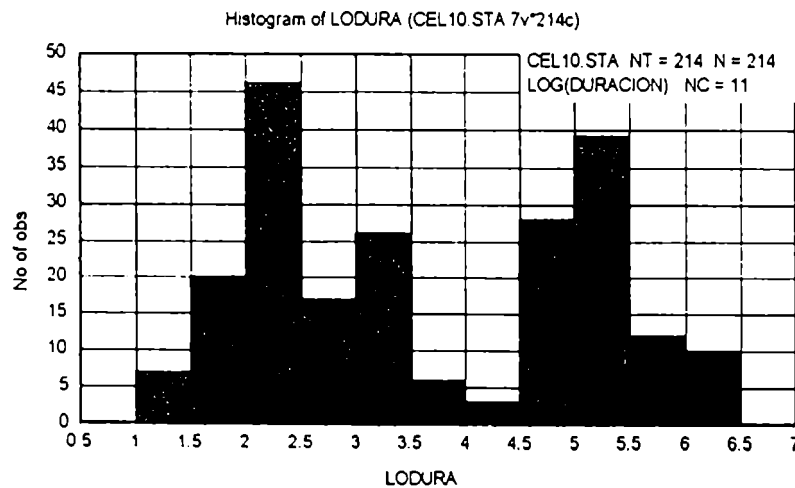


Figura 4.14: Distribución del Logaritmo de la Duración, ensayo  $\beta_1$ , CEL10.

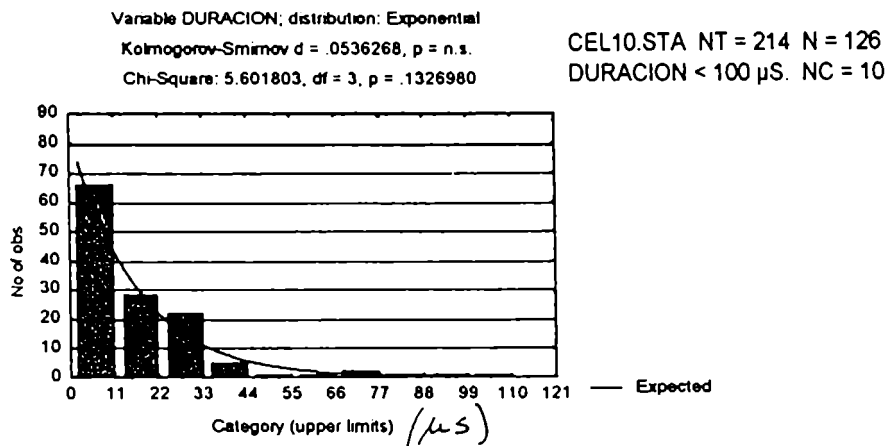


Figura 4.15: Distribución de la Duración, ensayo tipo  $\beta_1$ , CEL10, Duración < 100  $\mu$ .

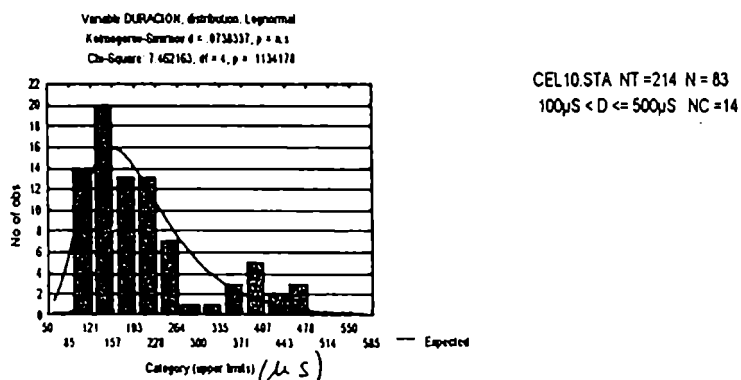


Figura 4.16: Distribución de la Duración, ensayo tipo  $\beta_1$ , CEL10, Duración > 100  $\mu$ s.

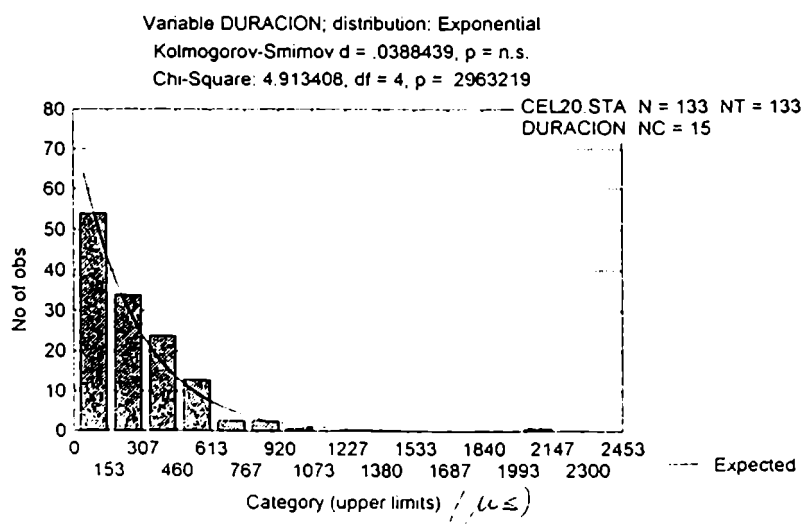


Figura 4.17: Distribución de la Duración, ensayo tipo  $\beta$ , CEL20.

Variable DURACION; distribution: Exponential  
 Kolmogorov-Smirnov d = .0895051, p = n.s.  
 Chi-Square: 9230147, df = 1, p = .3366919

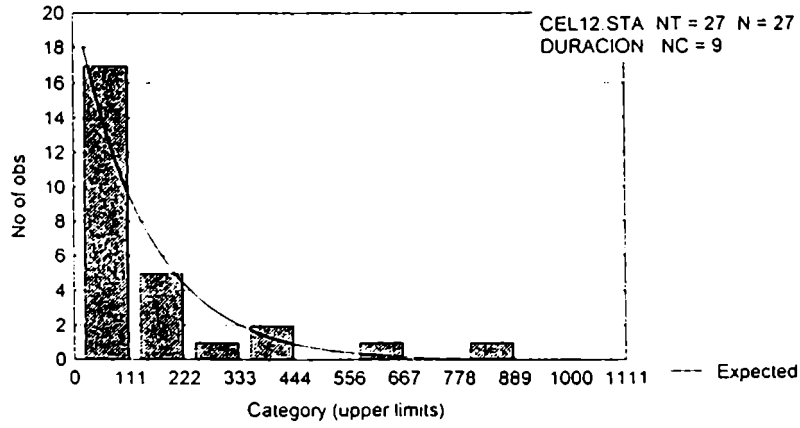


Figura 4.18: Distribución de la Duración ensayo tipo  $\alpha$ , CEL12.

Variable RISETIME; distribution: Normal  
 Kolmogorov-Smirnov d = .0910932, p = n.s.  
 Chi-Square: 8.403481, df = 6, p = .2100460

AROF1.STA NT = 64 N = 64  
 RISETIME( $\mu$ S) NC = 16

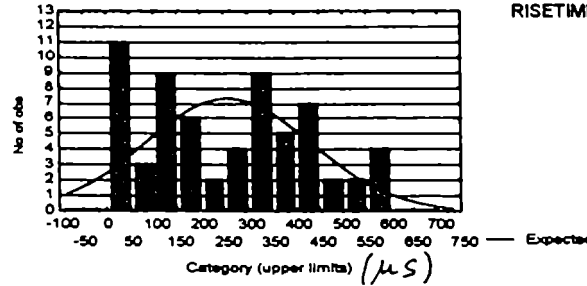


Figura 4.19: Distribución del Risetime, ensayo tipo  $\gamma$ , AROF1.

Variable RISETIME; distribution: Exponential  
 Kolmogorov-Smirnov d = .0250336, p = n.s.  
 Chi-Square: .0943709, df = 1, p = .7586943

CEL11.STA N = 65 NT = 65  
 RISETIME( $\mu$ S) NC = 10

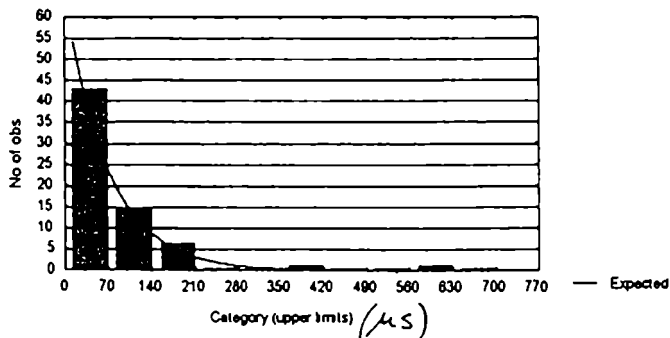


Figura 4.20: Distribución del Risetime, ensayo tipo  $\beta$ , CEL11.

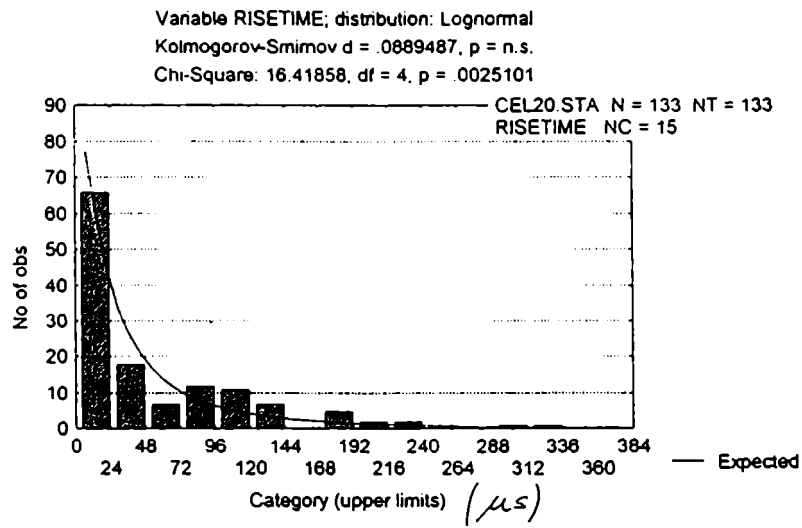


Figura 4.21: Distribución del Logaritmo del Risetime, ensayo tipo  $\beta$  , CEL20.

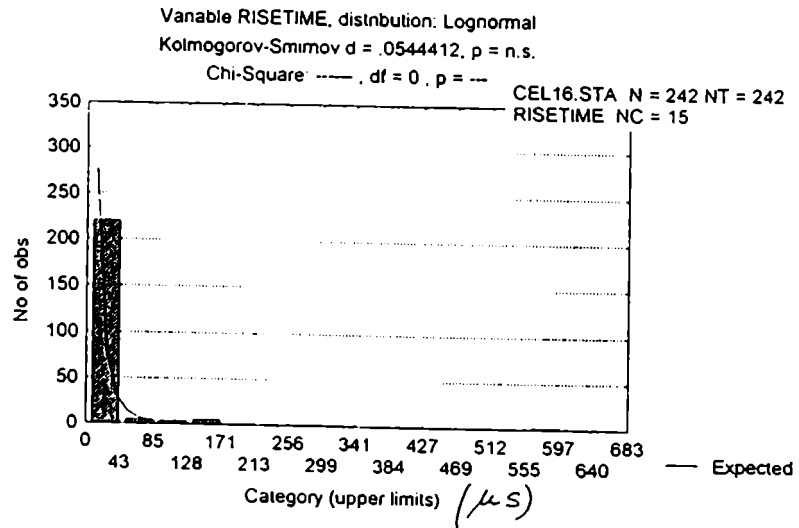


Figura 4.22: Distribución del Risetime, ensayo tipo  $\alpha_1$  , CEL16.

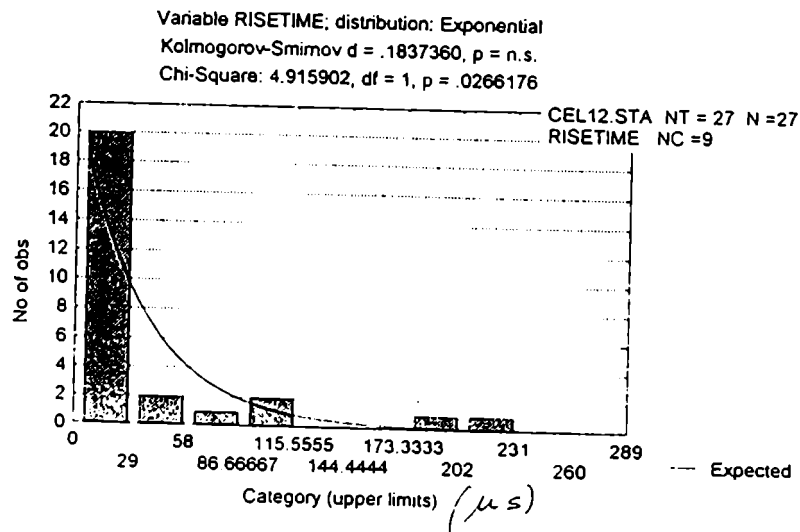


Figura 4.23: Distribución del Risetime, ensayo tipo  $\alpha$  , CEL12.

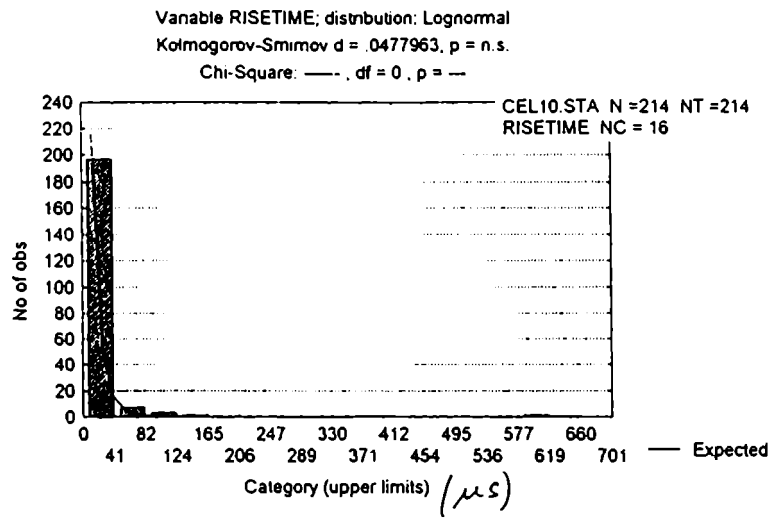
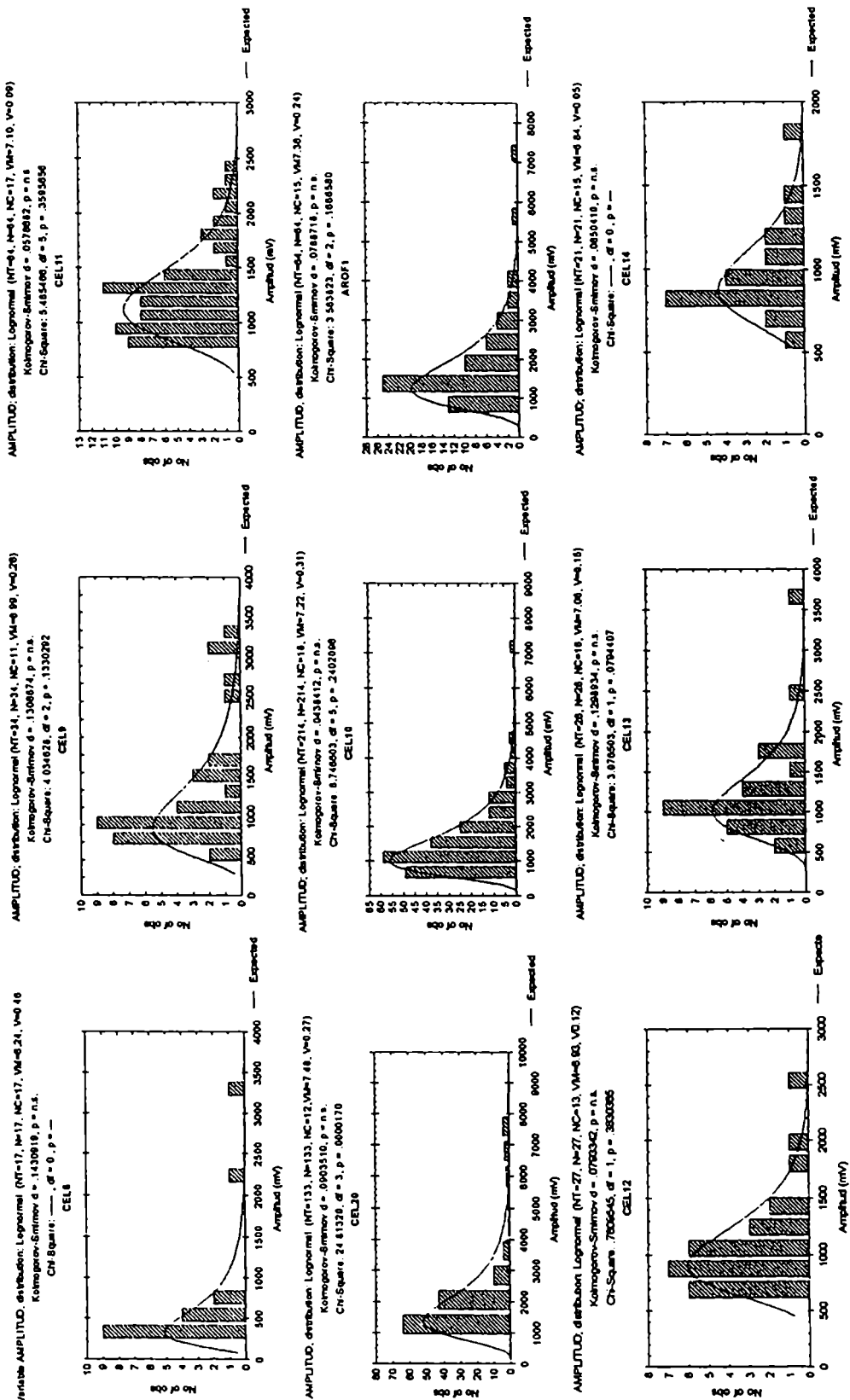
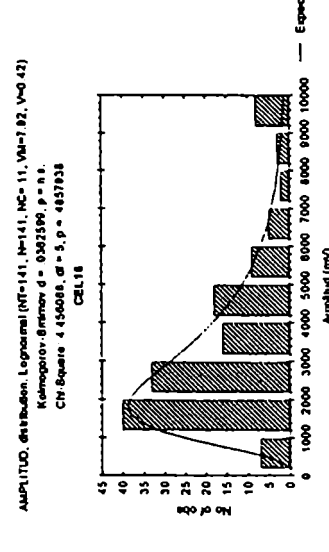
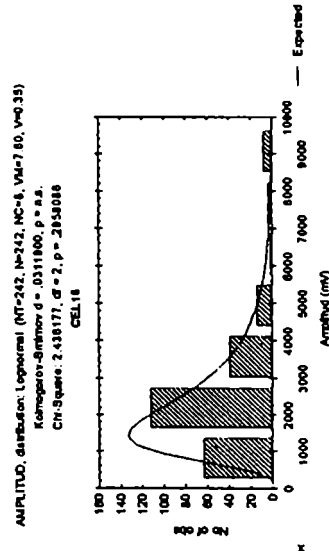
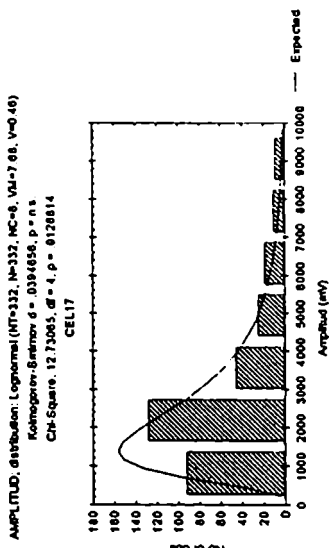


Figura 4.24: Distribución del Risetime, ensayo tipo  $\beta_1$ , CEL10.

Figura 4.25: Histograma de Amplitud y curva de ajuste Log-normal para todos los ensayos.





## 5. CONCLUSIONES

*En este Capítulo se reseñan las principales conclusiones del presente Trabajo de Tesis.*

Se diseñó e implementó un sistema experimental para estudiar la EA producida durante la deformación tridimensional de probetas en forma de aros. Se diseñaron y construyeron todos los componentes necesarios: dispositivo para abrir los aros, celda de carga para medir la fuerza aplicada, elemento para medir la separación de los extremos de los aros. Se diseñaron y construyeron distintos tipos de probetas, cortadas transversalmente de tubos de acero sin costura usados en la industria petrolera, a fin de inducir distintas fuentes de EA (deformación, creación y propagación de fisuras, rotura de la capa de óxido).

Se caracterizaron química, mecánica y metalográficamente los materiales de las probetas ensayadas. Las superficies de rotura de los dos materiales empleados, fueron observadas en un microscopio electrónico de barrido, identificándose los distintos tipos de fractura.

Se realizaron 22 ensayos, sirviendo los 10 primeros, para poner a punto todo el sistema de medición, eligiéndose los parámetros óptimos.

Se logró caracterizar cada tipo de probeta por el comportamiento medio de los parámetros Amplitud, Duración y Risetime de las señales de EA, obteniéndose una clara separación en "clusters". Esto permitirá en ensayos en campo sobre tubos similares, hacer una identificación general de las posibles fuentes de EA

Se estudiaron y analizaron los resultados de la EA producida en los últimos 12 ensayos, pudiéndose señalar las siguientes características:

- la EA producida por la deformación y creación de fisuras submicroscópicas presentó bajo número de eventos, con valores bajos de la Amplitud, Duración y Risetime;
- la propagación de microfisuras aumentó los valores de Duración y Risetime;
- la rotura de la capa de óxido aumentó mucho el número de eventos y la Amplitud mientras que disminuyó el Risetime;
- la propagación macroscópica de una fisura produjo los valores de Duración y Risetime más altos.

No se encontró un comportamiento temporal definido en la evolución de los parámetros de las señales de EA, a medida que avanzaba cada ensayo.

Estadísticamente se demostró que dentro de cada tipo de probeta, los ensayos son en general réplicas entre sí.



Se calcularon los coeficientes de correlación entre los tres parámetros de las señales de EA, para todos los ensayos, encontrándose la mayor correlación entre la Amplitud y la Duración.

Para cada ensayo, se estudió estadísticamente la distribución del parámetro Duración, no encontrándose una única función de distribución que ajustase todos los histogramas experimentales, lo mismo sucedió con el parámetro Risetime.

Para cada ensayo, se estudió estadísticamente la distribución del parámetro Amplitud, primero, de acuerdo a la ley potencial, obteniéndose valores del exponente comprendidos entre los citados en la literatura publicada. Recientes experiencias en la teoría estadística indican que las leyes potenciales tienen una significación especial. El exponente de una ley potencial es frecuentemente un número universal, característico de las interacciones subyacentes en el problema<sup>[4-15]</sup>. Es ésta una línea de futuro análisis.

Luego, nuevamente para cada ensayo, se estudió estadísticamente la distribución de este parámetro, encontrándose que una única función de distribución ajustaba todos los histogramas experimentales, dicha función fue la Log-normal, que ya aparecía citada en la literatura publicada.

Para buscar alguna explicación física al hecho anterior, se analizó primero la influencia del sistema de detección, demostrándose que el transductor piezoeléctrico de banda ancha empleado para recoger la EA producida durante los ensayos, mantiene la linealidad entre la amplitud de los impulsos mecánicos incidentes en el sensor (deformación de la superficie del material) y la amplitud de las señales eléctricas salientes (Amplitud de las señales de EA). Luego, se demostró que las amplitudes de las deformaciones dentro del material obedecen a una distribución Log-normal, debido a que éstas son el complejo resultado de un gran número de fuentes aleatorias independientes, pero cuyos efectos individuales están conectados. Además, los fenómenos de movimiento de dislocaciones y propagación de fisuras, presentes en distintas proporciones en todos los ensayos, tienen el mismo comportamiento desde el punto de vista estadístico. Teniendo en cuenta la linealidad del sistema de registro de la EA (fundamentalmente el transductor y el amplificador) se concluyó que las Amplitudes de las señales de EA deben seguir la misma distribución Log-normal.

Por último, considero necesario hacer algunos comentarios que creo pueden contribuir a conectar dos fenómenos que ocurren a escalas muy diferentes, pero que parecen responder a la misma dinámica.

Ya en la introducción se hizo referencia a que la EA, fenómeno que se produce a escala atómica, debido a las características microscópicas de la materia, podía relacionarse con fenómenos que a escala varios órdenes de magnitud mayor, ocurren en la corteza terrestre.

Los terremotos son rápidas fracturas en el material pretensionado de los contornos de las placas tectónicas. La intensidad de los terremotos cubre una escala de amplio rango; lo mismo sucede con el rango de variación de la Amplitud de las señales de EA, del orden de varios miles. De hecho, la distribución potencial de la Amplitud de las señales de EA, surgió de la sismología, teniendo en cuenta la intensidad de los terremotos. También, la EA y la sismología emplean la misma técnica de triangulación para la localización de zonas activas o fuentes.

En estudios de sismología<sup>[4-15]</sup>, uno de los modelos plantea que debido a la irreversibilidad de los terremotos, la ocurrencia de los mismos debería ser tratada en el

campo de la física no lineal. La deformación de la tierra en el tiempo y el espacio, en el interludio entre los eventos de fractura (terremotos), es un proceso complejo, con gran deformación previa a la fractura última. Los terremotos en sí mismos, son rápidos cambios en el estado de tensiones de la tierra, que suceden en una escala de tiempo mucho más chica que los eventos previos, y la ocurrencia y ubicación de cada uno, influencia la aparición en el tiempo y el espacio de los próximos terremotos. Las réplicas de un gran terremoto, que en sí mismos, son también terremotos, son sucesos disparados por un mayor terremoto predecesor, y pueden ocurrir en intervalos desde pocas horas hasta varios meses después. El terremoto madre genera una redistribución del campo de tensiones, que puede producir, en principio, otros terremotos en lugares remotos. Usando fundamentalmente la estadística, los sismólogos tratan de encontrar reglas que gobiernen estos fenómenos, empleando para ello nuevos conceptos como *criticalidad auto-organizada*, fractales y ruido  $1/f$ .

Creo firmemente que todos estos conceptos, después de un profundo estudio, pueden ser ampliamente aplicados a los fenómenos involucrados en la EA, ya que las causas, las consecuencias y los fenómenos en sí mismos, son muy similares.

Finalmente, como futuros aportes en la profundización de los temas aquí tratados, se sugieren los siguientes:

- Analizar y estudiar las señales digitalizadas durante el ensayo CEL20, a fin de encontrar posibles indicios que muestren patrones determinados.
- Realizar más ensayos con probetas similares, digitalizando también las señales, a fin de aumentar la estadística, aplicando las técnicas de análisis de señales (análisis en tiempo-frecuencia, "onditas", redes neuronales, ruido  $1/f$ , etc.).
- Realizar más ensayos con el mismo tipo de probetas pero con distintos tratamientos térmicos, a fin de modificar sus propiedades físicas, estudiando la EA producida.
- Profundizar la interpretación y el análisis de los parámetros Duración y Risetime, a fin de buscar la existencia de posibles relaciones con las fuentes de la EA.
- Profundizar a la luz los nuevos conceptos estadísticos (*criticalidad auto-organizada*, fractales y ruido  $1/f$ ), la comprensión de los fenómenos involucrados en la producción de la EA.

## 6. REFERENCIAS

### 6.1 - Del Capítulo 1

- [1-1] - "An introduction to acoustic emission", C. B. Scruby, J. Phys. Instrum., vol. 20, p. 946-953, 1987.
- [1-2] - "Acoustic Emission Inspection", Adrian A. Pollock, Methods of Nondestructive Evaluation, p. 278-294, 1989.
- [1-3] - Ark. Eisenhüttenwesen, Kaiser J., vol. 24, p.43, 1953.
- [1-4] - Modern Plastics, Green A. T., Lockman C. S., Steel R. K., vol.41, p. 137, 1963.
- [1-5] - "Arte de los metales", Álvaro Alonso Barba, cap. 32, Libro I, p. 59, Madrid, 1640. Comunicación personal del Ing. Tulio Palacios, Unidad de Actividad Materiales, Comisión Nacional de Energía Atómica.
- [1-6] - Advances in Acoustic Emission, Spanner J. C., (USA: Dunhart), n. 1, 1981.
- [1-7] - Prog. Nucl Energy, Scruby C. B., Wadley H. N. G., vol.11, p. 275, 1983.
- [1-8] - Int. J. Pressure Vessels Piping, Runow P., vol. 21, p. 157, 1985.
- [1-9] - Plastic Rubber Proc. Applns, Phillips M. G., Guild F., Harris B., vol. 4, p. 1, 1984.
- [1-10] - Progress in Acoustic Emission III, Fowler T. J., Tokio: Japanese Society of NDI, p. 150, 1986.
- [1-11] - Hazards, Roger L. M., (I Chem E. Symposium Series No. 97), 1987.
- [1-12] -Mater. Sci. Engn., Wadley H. N. G.,Mehrabian R., Mater Sci. Engng., vol. 65, p. 245, 1984.
- [1-13] - NDT Int., Bentley P. G., Dawson D. G., Prine D. W., vol. 15, p. 243, 1982.
- [1-14] - Engng. Mater. Tech., Lan M. S., Dornfeld D. A. J., vol. 106, p. 111, 1984.
- [1-15] - Int. Metal Rev., Wadley H. N. G., Scruby C. B., Speake J. H., vol. 3, p. 41, 1980.
- [1-16] - Research Techniques in Nondestructive Testing, Scruby C. B., vol. 8, de R. S. Sharp (London Academic), p. 141, 1985.
- [1-17] - "Acoustic Emission, Principles and Instrumentation", A. G. Beattie, Jour. Of Acoustic Emission, vol. 2, No. 1 / 2 , p. 95-128., 1983.
- [1-18] - J. Sound Vibration, Achenbach J. D., Hirashima K., Onho K., vol. 89, p. 523, 1983.
- [1-19] - Progress in Acoustic Emission III (Tokio: Japanese Society of NDI), Fukunaga Y, Kishi T., p.722, 1986.
- [1-20] - -"Emisión Acústica, aplicaciones y fuentes", J. E. Ruzzante, PMM/A-0000158/94, IT/A-26/94, Inst. Tecnol. Prof. J. Sábato, UNSAM-CNEA, 1994

[1-21] - "Acoustic Emission Amplitude Distributions", Pollock A. A., International Advances in Nondestructive Testing, vol. 7, p. 215-239, 1981.

[1-22] - "Long Duration AE Events in Filament Wound Graphite/Epoxy in the 100-300 KHz Band Pass Region", Gorman M. R., Rytting T. H., First International Symposium on Acoustic Emission From Reinforced Composites, The Society of Plastic Industry, 1983.

[1-23] - NDT Int., Scala C. M., Coyle R. A., vol. 16, p. 339, 1983.

[1-24] - Int. J. Fracture, Scruby C. B., Baldwin G. R., Stacey K. A., vol. 28, p. 201, 1985.

[1-25]: - "Modelo matemático para la simulación de eventos de Emisión Acústica", L.V. Pérez, M. Armeite, M. I. López Pumarega, J. E. Ruzzante, presentado en el "Congreso Regional de Ensayos No Destructivos", Actas CORENDE, pp. 299-303, 27 al 30 de octubre de 1997, Mendoza, Argentina.

[1-26] - "Acoustic Emission Testing", Miller R. K., McIntire P., Nondestructive Testing Handbook, 2<sup>nd</sup> Edi., American Society for Nondestructive Testing, vol. 5, p. 340, 421-424, 434-443, 226-259, 333-339, 276-271, 1987.

[1-27] - "Erkenntnisse und Forderungen aus der Messung von Geräuschen bei Zugbeanspruchung von Metallischen Werkstoffen", Kaiser J., Arch. Eisenhüttenwes., vol. 24 (No. 1-2), p 43-45, 1953.

[1-28] - "Acoustic Emission", Dunegan H.L., Tetelman A. S., Res. Dev., vol. 22 (No. 5), p 20-24, 1971.

[1-29] - "Non-destructive Testing of Fibre-reinforced plastics composites", J. Summerscales, Elsevier Applied Science, Vol. 1, cap. 2, p.30-33, 1987.

[1-30] - "Acoustic Emission Produced by Deformation of Metals and alloys - A review: Part I", C. R. Heiple, S. H. Carpenter, Jour. of Acoustic Emission, vol. 6, No. 3, p.177-204, 1987.

[1-31] - Philos. Mag. A, C. B. Scruby, H. N. G. Wadley, J. E. Sinclair, vol. 44, p. 249-274, 1981.

[1-32] - Appl. Phys., D. R. James, S. H. Carpenter, vol. 42, p. 4685-4697, 1971.

[1-33] - Metall. Trans., A. B. L. Agarwal, J. R. Frederick, D. K. Felbeck, vol. 1, 1069-1071, 1970.

[1-34] - Proceedings of the Ninth World Conference on Nondestructive Testing, M. A. Hamstad, R. G. Patterson, A. K. Mukherjee, Australian Institute Of Metals, Parkville, Victoria, Australia, Paper 4J-10, 1979.

[1-35] - Met. Sci., M. A. Hamstad, E. M. Leon, A. K. Mukherjee, vol. 15, 541-548, 1981.

[1-36] - "Acoustic Emission Produced by Deformation of Metals and Alloys - A Review: Part II", C. R. Heiple, S. H. Carpenter, Journal of Acoustic Emission, Vol. 6, No. 4, p. 215-237, 1987.

[1-37] - Mater. Sci. Eng., K. Ono, M. Yamamoto, vol. 47, 247-263, 1981.

[1-38] - "Microscopic Aspects of Fracture and Acoustic Emission in Metals", Ken-ichi Sano, Katsumi Fujimoto, Research Laboratories, Kawasaki Steel Corporation, Japón, p. 131-164, 1979.

[1-39] - "On the Amplitude Distribution of Burst Emission due to MnS Inclusions in HSLA steels", K. Ono, R. Landy, C. Ouchi, Proc. 4<sup>th</sup>. AE Symp., Tokio, Japón, p. 4-33, 1978.

[1-40] - Met. Trans. A, W. W. Gerberich, D. C. Atteridge, J. F. Lessar, 6A, 797, 1975.

## **6.2 - Del Capítulo 2**

[2-1] - "Handbook of Experimental Stress Analysis", M. Hetényi, Ed. J. Wiley and Sons, London.

[2-2] - "Strain Gauge Installations with M-Bond 200 Adhesive", "M-Line Accessories, Instruction Bulletin B-127-6", Micro-Measurements Division, Measurements Group, USA, 1979.

[2-3] - "AEDOS. Sistema Multicanale di Acquisizione ed Elaborazione Dati di Emissione Acustica, Manuale D'Istruzione", N. SSS-MI-88-001, CISE Tecnologie Innovative, Italia, 1988.

## **6.3 - Del Capítulo 3**

[3-1]: "Informe N° 940055", Departamento Química Analítica, Comisión Nacional de Energía Atómica, 1994.

[3-2]: "Certificado de Análisis N° 970358", Unidad de Actividad Química, Comisión Nacional de Energía Atómica, 1998.

[3-3]: "Informe IT-MAT 58/97, Caracterización de material", R. Montero, División Metalografía y Daño por Hidrógeno, Unidad de Actividad Materiales, Comisión Nacional de Energía Atómica, 1997.

## **6.4 - Del Capítulo 4**

[4-1]: "Acoustic Emission Signal Analysis from steel tubes", M. I. López Pumarega, J. E. Ruzzante, Procc. "14<sup>th</sup> World Conference on Non Destructive Testing (14<sup>th</sup> WCNDT)", vol. 4, pag. 2493-2496, New Delhi, India, 8-13 de Diciembre, 1996,

[4-2]: "Análisis estadístico de las agrupaciones clusters en fenómenos de Emisión Acústica", A. Suárez Lloréns, trabajo desarrollado durante la Beca Intercampus de la Universidad de Sevilla (España) y la Universidad Nacional de General San Martín

(Argentina), en la Comisión Nacional de Energía Atómica. Directores: J. E. Ruzzante, M. I. López Pumarega; septiembre-octubre, 1998.

[4-3]: - "Modelo matemático para la simulación de eventos de Emisión Acústica", L.V. Pérez, M. Armeite, M. I. López Pumarega, J. E. Ruzzante, presentado en el "Congreso Regional de Ensayos No Destructivos", Actas CORENDE, pp. 299-303, 27 al 30 de octubre de 1997, Mendoza, Argentina.

[4-4]: "Estudio y Caracterización de la Emisión Acústica en Vainas Combustibles tipo CANDU", J. A. Regueiro, Tesis de Magister en Ciencia y Tecnología de los Materiales, Instituto de Tecnología Prof. J. Sábató, Universidad Nacional de General San Martín, Comisión Nacional de Energía Atómica, Directores: J. E. Ruzzante, M. I. López Pumarega, 1998.

[4-5] - "Amplitude Distribution of Acoustic Emission signals", Y. Nakamura, C. L. Veach, B. O. McCauley, Acoustic Emission, ASTM STP 505, p. 164-186, 1972.

[4-6]: "Acoustic emission - 2, Acoustic emission amplitudes", A. A. Pollock, Non-Destructive Testing, pág. 264-269, octubre de 1973.

[4-7]: "Applications of Acoustic Emission Techniques to Structural Integrity Assessment", H. Nakasa, Deutsche Gesellschaft Für Metalkunde E. V., pág. 311-324, abril, 1979.

[4-8]: "Acoustic Emission Amplitude Distributions", A. A. Pollock, International Advances in Nondestructive Testing, vol. 7, pág. 215-239, 1981.

[4-9] - "On the Amplitude Distribution of Burst Emission due to MnS Inclusions in HSLA steels", K. Ono, R. Landy, C. Ouchi, Proc. 4<sup>th</sup>. AE Symp., Tokio, Japón, p. 4-33, 4-45, 1978.

[4-10]: "Time and Amplitude Statistics of Acoustic Emission Signals in Fracture Mechanic Experiments", S Erlenkämper, "Acoustic Emission, Deutsche Gesellschaft für Metalkunde e.V.", Abril, 1979.

[4-11]: "Analysis of Acoustic Emission Signal Parameters in Steel Tubes", M. I. López Pumarega, R. Piotrkowski, J. E. Ruzzante, "Ultrasonics and Acoustic Emission 35<sup>th</sup> International Conference on", Trest, República Checa, 14-18 de septiembre de 1998, a publicarse en Actas.

[4-12]: - "Discussion of the Log-normal Distribution of Amplitudes in Acoustic Emission Signals", M. I. López Pumarega, R. Piotrkowski, J. E. Ruzzante, aceptado en noviembre de 1998, para su publicación en el Journal of Acoustic Emission.

[4-13]: - "Discusión de la Distribución Log-normal de las Amplitudes en Eventos de Emisión Acústica", M. I., López Pumarega, R. Piotrkowski, J. E. Ruzzante, presentado en el "Congreso Regional de Ensayos No Destructivos y Estructurales", Actas CORENDE, pp. 293- 297, 27 al 30 de octubre de 1997, Mendoza, Argentina.

[4-14]: "Statistical Models in Applied Science", K. V. Bury, John Wiley & Sons, USA, 1975.

[4-15]: "Disorder and Fracture", editado por Plenum Press, New York, USA, 1990.

[4-16]: "Análisis del ruido 1/f en señales de Emisión Acústica", R. Piotrkowski, M. P. Gómez, J. E. Ruzzante, Proceedings de la "VII Reunión de Trabajo en Procesamiento de la Información y Control (RPIC'97)", Vol. 1, pág. 53-57, San Juan, 17-19 septiembre de 1997.

[4-17]: "Mathematical Methods of Statistics", H. Cramer, Princeton University Press, New York, pp. 218-221, 1961.

## 7. AGRADECIMIENTOS

Al Jefe de la Unidad de Actividad ENDE, y a todo su personal, por haber permitido el desarrollo de este trabajo de Tesis en uno de sus laboratorios.

A los Sres. Andrés Tsingas y Ernesto Alonso, por la construcción y maquinado de las probetas, y de los distintos dispositivos desarrollados.

Al Lic. Mauricio Sachi, por su ayuda en el diseño de la celda de carga, y al Dr. Gerardo Rubiolo, por su colaboración en la calibración de la misma.

Al Ing. Juan José Valderrama del Grupo de Investigación Mecánica de Fractura y al Ing. Claudio Sanzi del Grupo de Investigación Estructural, de la Universidad Tecnológica Nacional, Regional Haedo, por su asesoramiento y la preparación de las probetas con prefisura por fatiga.

Al personal de la División Metalografía, por su ayuda en la realización de las metalografías.

A la Lic. María Elisa Oliveto, por su ayuda en el análisis y discusión del estudio de las distribuciones de la Duración y el Risetime de las señales de EA.

A la Dra. Rosa Piotrkowski, por su asesoramiento, discusión, lectura y corrección de los manuscritos.

Al Ing. Ariel José Regueiro, por el provechoso intercambio de ideas.

A la Srta. María Armeite, por su comprensión y acompañamiento durante estos años de trabajo, al igual que a la Sra. Angélica Straus hasta el año 1996.

Al Dr. José E. Ruzzante, por la dirección de este Trabajo de Tesis y su constante asesoramiento.

A toda mi familia, por su comprensión y apoyo en los ratos no compartidos durante estos años dedicados al Doctorado.

María Isabel López Pumarega.

Mayo de 1999



## 8. APÉNDICE

### ELEMENTOS DE ESTADÍSTICA

Función aleatoria: para valores fijos del argumento, los valores de la función son aleatorios (al azar).

Procesos estocásticos: procesos que son descritos por una función aleatoria de argumento temporal.

Valor medio ( $\bar{x}$ ): es la media aritmética de todos los valores de la muestra. Su expresión matemática es:

$$\bar{x} = 1/n \times \sum_{i=1}^n x_i$$

donde:

- $x_i$  es el valor del elemento  $i$ -ésimo
- $n$  es el tamaño de la muestra

Mediana: valor que divide en dos grupos de igual número de elementos al conjunto de los valores de la muestra ordenados en forma creciente.

Cuartiles: son tres valores que en la ordenación creciente de la muestra, la dividen en cuatro grupos de igual número de elementos, con un 25 % del total cada uno. El segundo cuartil coincide con la *mediana*. El primer cuartil o cuartil inferior, divide en dos grupos de igual número de elementos a los valores de la muestra menores que la mediana, y el tercer cuartil o cuartil superior, análogamente, hace lo mismo con los valores mayores que la mediana.

Rango intercuartil: es la diferencia entre el cuartil superior y el inferior, es decir, reúne al 50% del total de valores de la muestra que están ubicados a ambos lados de la mediana.

Desviación estándar ( $\sigma$ ): es la medida de la dispersión de los valores alrededor del valor medio. Su expresión matemática es:

$$\sigma = \sqrt{1/n \times \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}$$

Varianza (V): es el cuadrado de la desviación estándar. Su expresión matemática es

$$V = 1/n \times \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2$$

Coefficiente de asimetría o "skewness" (S): es una medida de la asimetría de la curva de distribución de una variable, respecto del valor medio. Un valor negativo indica una asimetría hacia la izquierda, un valor positivo indica una asimetría hacia la derecha. Su expresión matemática es:

$$S = 1/n \times \left[ \sum_{i=1}^n \left\{ \left( (x_i - \bar{x}) / \sigma \right)^3 \right\} \right]$$

Coefficiente de aplanamiento o "kurtosis" (K): es una medida del aplanamiento de la curva de distribución, cuanto más lentamente tienda a cero la distribución, tanto más grande será este coeficiente. Su expresión matemática es:

$$K = 1/n \times \left[ \sum_{i=1}^n \left\{ \left( (x_i - \bar{x}) / \sigma \right)^4 \right\} \right] - 3$$

Coefficiente de correlación: valor que mide la correlación entre dos variables aleatorias. Los coeficientes de correlación varían entre -1.00 y +1.00. El valor 0.00 representa falta de correlación.

Análisis no paramétrico: estudio en el que se desconoce el valor de los parámetros de las funciones de distribución buscadas.

Análisis multivariante: en el fenómeno en estudio existen muchas variables.

Test de hipótesis estadística: establece una regla de decisión para la aceptación o rechazo de una hipótesis estadística, sobre la base de una muestra determinada.

Análisis de Varianza (ANOVA): procedimiento que se utiliza para analizar la igualdad de los valores medios entre distintos conjuntos de datos, bajo la hipótesis de que las distribuciones son normales y que las varianzas son iguales.

Hipótesis nula ( $H_0$ ): es la hipótesis que se quiere analizar, generalmente es la más sencilla de formular matemáticamente, es decir, la igualdad de algún parámetro, tomando como hipótesis alternativa ( $H_1$ ) la desigualdad de dicho parámetro.

En el caso de buscar el ajuste teórico de una curva experimental, la  $H_0$  implica asumir que la función teórica propuesta ajusta la curva experimental.

Error Tipo I: probabilidad de rechazar  $H_0$  cuando debería ser aceptada.

Error Tipo II: probabilidad de aceptar  $H_0$  cuando debería ser rechazada.

La suma de los errores tipo I y II da siempre 1, de modo que considerar un error tipo I demasiado chico implica aceptar un error tipo II demasiado grande.

Nivel de significación ( $\alpha$ ): máxima probabilidad de cometer error tipo I. Generalmente se trabaja con  $\alpha = 0.05$ .

Valor-p: es el menor nivel de significación que se podría aceptar, es decir, es la probabilidad de rechazar  $H_0$  cuando debería ser aceptada, por lo tanto, resultados con un valor-p  $> \alpha$  no deberían ser rechazados.

Test de bondad de ajuste: procedimiento para probar el ajuste de una curva teórica sobre la base de una muestra de datos experimentales. La aceptación o rechazo se basa en la comparación entre el valor-p obtenido con el test y el nivel de significación elegido ( $\alpha$ ).

Test de Pearson Chi-cuadrado: test de bondad del ajuste. La expresión matemática del valor  $\chi^2$  es:

$$\chi^2 = \sum \frac{(\text{frecuencias observadas} - \text{frecuencias esperadas})^2}{\text{frecuencias esperadas}}$$

Elegido un nivel de significación ( $\alpha$ ), y teniendo en cuenta los grados de libertad correspondientes, de tablas especiales se puede determinar un valor crítico de  $\chi^2_c$  que permite conocer si los datos experimentales contradicen la  $H_0$  propuesta. Si el valor-p calculado para el test, es mayor que el  $\alpha$  elegido, entonces no debería rechazarse el ajuste con la curva teórica propuesta.

Este test es más apropiado para variables discretas ya que es sensible al número de intervalos en que se divide el rango de valores de la variable, siendo menos potente para el caso de variables continuas.

Test de Kolmogorov: test de bondad de ajuste. Mide la máxima desviación ( $D_m$ ) entre la función teórica y la experimental. Para variables continuas es más potente que

el de Pearson Chi-cuadrado debido a que no es sensible al número de celdas en que se divide el rango de valores obtenidos.

La expresión matemática es:

$$D_m = \supremo \left| F_{teór}(x_i) - F_{exp}(x_i) \right|$$

donde:

- $F_{teór}(x_i)$  es la Función de Distribución Acumulada teórica
- $F_{exp}(x_i)$ : es la Función de Distribución Acumulada de los datos experimentales.

Si el valor-p calculado para el test, es mayor que el  $\alpha$  elegido, entonces no debería rechazarse el ajuste con la curva teórica propuesta.

Este test es más apropiado para variables continuas, ya que no depende del número de intervalos en que se divide el rango de variación de la variable.

Análisis de "clusters": diferentes métodos para agrupar datos en subgrupos ("clusters"). Se usa fundamentalmente para organizar gran cantidad de datos observados, en estructuras que tengan algún significado, cuando no existe ninguna hipótesis a priori.

Método de las K-medias: es un método de agrupación en "clusters", que va agrupando los valores experimentales en el número de "clusters" especificado por el usuario, con el objetivo de minimizar la variabilidad *dentro* de los "clusters" y maximizar la variabilidad *entre* "clusters".