



**INSTITUTO DE
TECNOLOGIA**

PROF. JORGE A. SABATO

**UNIVERSIDAD NACIONAL
DE GENERAL SAN MARTIN**

**COMISION NACIONAL
DE ENERGIA ATOMICA**

**MAESTRIA EN
CIENCIA Y
TECNOLOGIA
DE MATERIALES**

ESTUDIO Y CARACTERIZACIÓN DE LA EMISIÓN ACUSTICA EN VAINAS COMBUSTIBLES TIPO CANDU

Ariel Regueiro

UNIVERSIDAD NACIONAL DE GENERAL SAN MARTIN
COMISION NACIONAL DE ENERGIA ATOMICA
INSTITUTO DE TECNOLOGIA
"Prof. Jorge A. Sábato"

Estudio y Caracterización de la Emisión Acústica en Vainas Combustibles tipo CANDU (*)

por Ing. José Ariel Regueiro

Director

**Dr. José E. Ruzzante
Lic. Maria Isabel López Pumarega**

COMISION NACIONAL DE ENERGIA ATOMICA CENTRO DE INFORMACION C A C

(*) Tesis para optar al título de *Magister en Ciencia y Tecnología de Materiales*

República Argentina

1998

RESUMEN

En el presente trabajo se efectuó el análisis y caracterización de la Emisión Acústica (EA) en vainas combustibles de Zircaloy-4, tipo CANDU. Para ello se sometió a las vainas a un ensayo de presurización interna, con extremos cerrados y a temperatura ambiente, hasta alcanzar la rotura.

La primera parte del trabajo consistió en construir y poner a punto el equipo de presurización, en base a distintas partes ya existentes y al diseño de las faltantes. También se ajustaron todos los aspectos referidos a la técnica de medición.

En la segunda parte se realizaron ensayos de explosión para estudiar la EA en vainas provistas a tal efecto por CONUAR S.A., las que fueron tomadas de la producción. Posteriormente se trabajó con otro lote de vainas con distintos defectos superficiales típicos de fabricación, que son excluidas de la línea de producción. Estos defectos superficiales se producen durante la fabricación de las vainas y son detectados e individualizados en la etapa de control por medio de ultrasonido. Se incluye aquí una caracterización de los defectos a través del Microscopio Electrónico de Barrido (MEB).

Durante los ensayos y mediante sensores adecuados se captaron los eventos de EA que fueron adquiridos y procesados por el equipo de análisis. Luego se analizaron todos los eventos registrados para poder caracterizar la EA. En todos los ensayos, la mayoría de los eventos se producen entre el 90% y el 100% de la presión de rotura y se observó que en las vainas defectuosas comienzan a producirse eventos de EA a presiones inferiores a las de inicio de la emisión para las vainas sin defectos. Se investigó la posible relación entre las distintas características de los eventos y la presencia o no de defectos. Se encontró que la duración de los eventos podría usarse para distinguir entre las vainas sin defectos y las defectuosas. Si bien esto sería un resultado importante, no tiene por ahora significación estadística. Es necesario continuar realizando más ensayos para llegar a conclusiones más firmes.

SECCION	PAG.
1 INTRODUCCIÓN	1
1.1 Emisión Acústica	1
1.2 Generación de la Emisión Acústica	3
1.2.1 Movimiento de dislocaciones	3
1.2.2 Maclas de deformación	4
1.2.3 Fractura y decohesión de inclusiones	6
1.2.4 Fractura	7
1.2.4.1 Fisura dúctil	8
1.2.4.2 Expansión de la zona plástica	8
1.3 Ondas Acústicas	10
1.3.1 Movimiento de las ondas	11
1.3.2 Características del material	12
1.3.3 Tipos de ondas acústicas	13
1.3.4 Dispersión	15
1.3.5 Atenuación	15
1.4 Sensores	15
1.5 Principios de instrumentación	17
1.5.1 Detección y conteo de la señal	18
1.5.2 Parámetros de la medición de la señal	20
1.5.3 Presentación de los datos	21
1.6 Caracterización del material	23
1.6.1 Historia	23
1.6.2 Aleaciones	24
1.6.3 Fabricación de tubos de Zircaloy	24
1.6.4 Propiedades mecánicas	26
1.6.5 Precipitados	28
2 EQUIPO EXPERIMENTAL	29
2.1 Equipo de presurización	29
2.1.1 Cilindro multiplicador de presión	30
2.1.2 Bomba hidráulica	31
2.1.3 Válvulas	32
2.1.4 Acople vaina-cilindro	32
2.1.5 Caja de protección	33
2.1.6 Comando electrónico del equipo	35
2.1.7 Circuito del sensor de presión	36
2.2 Equipo de Emisión Acústica	37
2.2.1 Descripción funcional	37
2.2.1.1 Sección de traducción	38

2.2.1.2	Sección de tratamiento individual de la señal del transductor	38
2.2.1.3	Sección de gestión centralizada de cada evento de Emisión	
	Acústica	39
2.2.1.4	Sección elaboradora de datos	39
2.3	Sensores de EA	39
3	RESULTADOS EXPERIMENTALES	40
3.1	Descripción de los ensayos	40
3.2	Caracterización de los defectos en las vainas	42
3.2.1	Uñazo	44
3.2.2	Desgarro	46
3.2.3	Raya longitudinal	48
3.2.4	Impronta	50
3.2.5	Puntos negros alineados	52
3.2.6	Facetado	54
3.2.7	Ovalidad	56
3.3	Caracterización de la fractura	57
3.4	Resultados de los ensayos	59
3.4.1	Ensayo 23	62
3.4.2	Ensayo 24	64
3.4.3	Ensayo 25	66
3.4.4	Ensayo 27	68
3.4.5	Ensayo 28	70
3.4.6	Ensayo 29	72
3.4.7	Ensayo 30	74
3.4.8	Ensayo 31	76
3.4.9	Ensayo 33	78
3.4.10	Ensayo 34	80
3.4.11	Ensayo 35	82
3.4.12	Ensayo 36	84
4	DISCUSION	86
4.1	Caracterización de la fractura	86
4.2	Caracterización de las vainas por EA	87
4.2.1	Por la presión de rotura	87
4.2.2	Por el número de eventos	88
4.2.3	Por la relación eventos-presión	89
4.2.4	Posibles fuentes de EA	89
4.2.5	Análisis estadístico de los parámetros de los eventos	90
4.2.5.1	Amplitud	90
4.2.5.2	Duración	91
4.2.5.3	Rise time	91

4.2.5.4	Valores medios	93
5	CONCLUSIONES	110
6	REFERENCIAS	111
7	AGRADECIMIENTOS	113
8	APENDICE	114

1- INTRODUCCION

1.1- EMISION ACUSTICA.

El término Emisión Acústica (EA) se usa para describir una técnica, y el fenómeno sobre el cual se basa la técnica. Si hay una repentina liberación de energía dentro de un sólido, causado por ejemplo por el crecimiento de una fisura, entonces parte de la energía se disipa en forma de ondas elásticas. La proporción de energía liberada como ondas elásticas, en vez de calor por ejemplo, depende de la naturaleza de la fuente, de lo localizada que esté y de la rapidez de la liberación. Liberaciones de energía rápidas y localizadas, dan lugar a ondas elásticas en el rango de frecuencias del ultrasonido. Estas ondas pueden ser detectadas por micrófonos o transductores en contacto con la superficie de la muestra, siempre que las ondas sean de una amplitud adecuada. Todo este proceso es conocido como EA. Las señales detectadas por los transductores son también conocidas como EA o señales de EA. La fig.1 muestra el principio básico del método de EA. [1].

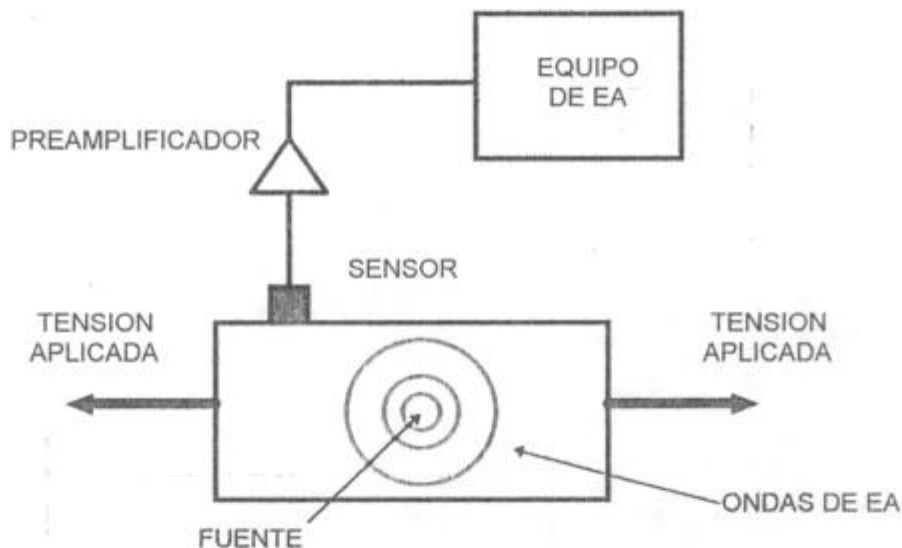


Fig. 1. Principio básico del método de Emisión Acústica

La fuente de la energía de la EA es el cambio en el campo de tensiones en el material, por ello sin sollicitación no hay EA.

Hay una serie de fuentes potenciales de EA que enumeramos a continuación:

- Degradación del material: crecimiento de defectos, avance de fisuras, deformación plástica, fractura de inclusiones o precipitados, degradación de la superficie, incluyendo corrosión y despegado de recubrimientos
- Procesos reversibles: transformaciones de fase cristalográficas, fundido o solidificación, efectos termoelásticos, movimiento de dominios ferromagnéticos y ferroeléctricos, fricción entre superficies.
- Procesos de fabricación: ruido de fundición (incluyendo creación de defectos), rolado, forjado, maquinado, agujereado, etc.
- Pérdidas y paso de fluido: flujo de fluidos de una o dos fases, pérdidas, evolución de gases, ebullición.

Como se ve, muchos procesos diferentes generan señales de EA. [1].

La EA puede presentarse de manera discontinua o continua. La primera, llamada "Burst", esta más bien asociada con el crecimiento macroscópico de un defecto y tiene un alto contenido energético. En contraste con la discontinua la emisión continua es de baja amplitud y se produce cuando en la red cristalina tiene lugar algún proceso de flujo plástico localizado. En la emisión continua no están bien definidos el comienzo y el final de los eventos. [13].

La EA puede ser utilizada de varias maneras: como una técnica investigativa, para ayudar a entender el comportamiento mecánico de los materiales, como una técnica de ensayos no destructivos para testear la integridad estructural de los componentes o como un método de control de calidad.

La EA se distingue de otros métodos de ensayos no destructivos en dos aspectos claves:

a) La señal tiene su origen en el mismo material, no en una fuente externa (en ultrasonido la onda acústica es generada por una fuente externa y luego se propaga dentro del material).

b) La EA detecta movimiento de defectos (es una técnica dinámica), mientras que otros métodos detectan discontinuidades geométricas (técnicas estáticas).

Una ventaja importante de la EA es que permite que el volumen total de la estructura sea inspeccionado de manera no intrusiva y de una sola vez. No es necesario rastrear la estructura buscando defectos localizados. Solo es necesario conectar un número adecuado de sensores fijos. Esto lleva a ahorros importantes cuando se examinan estructuras grandes. En general la inspección global con EA se usa para identificar áreas con problemas estructurales, y otros métodos se usan luego para identificar de modo más preciso la naturaleza de los defectos. [5].

Las consecuencias de estas diferencias fundamentales se resumen en la tabla I. [5].

TABLA I

DIFERENCIAS ENTRE LA EA Y OTROS METODOS

Emisión Acústica	Otros Métodos *
Detecta movimiento de defectos	Detecta la forma geométrica de defectos
Requiere sollicitación	No requiere sollicitación
Cada inspección es única	La inspección es repetible
Más sensible al tipo de material	Menos sensible al tipo de material
Menos sensible a la geometría	Más sensible a la geometría
Menos intrusiva en la planta/proceso	Más intrusiva en la planta/proceso
Requiere acceso solo a los sensores	Requiere acceso a toda el área de inspección
Testea toda la estructura a la vez	Testea distintas zonas en secuencia
Principal problema: depende del ruido	Principal problema: depende de la estructura

* Ultrasonido, etc.

1.2- GENERACION DE EA

La EA se genera durante cambios transitorios en los campos locales de tensión y deformación dentro del material. Estos cambios acompañan procesos de deformación, fractura o transformaciones de fase.

La energía de las ondas elásticas que constituyen la forma de onda es provista por el trabajo proporcionado por la carga externa.

1.2.1- MOVIMIENTO DE DISLOCACIONES.

Hay mucha evidencia [2] de que el movimiento de las dislocaciones produce EA durante la deformación de muchos materiales. Es poco probable que el movimiento no coordinado de dislocaciones individuales pueda ser detectada por mediciones de EA excepto en el caso de la medición durante la deformación de monocristales de alta pureza y policristales de grano muy grande. Se requiere el movimiento casi simultáneo de muchas dislocaciones dentro de un pequeño volumen. Además de la formación de un paquete de dislocaciones móviles también se necesita que el paquete se mueva una distancia suficiente y a una velocidad suficiente, de otra manera las ondas elásticas son demasiado pequeñas para ser detectadas. Como en general estas condiciones no se dan simultáneamente, solo una pequeña fracción del movimiento de las dislocaciones dentro de un material producirá EA. [2].

Variables tanto del ensayo como microestructurales cambian la probabilidad de la formación de paquetes, su distancia y velocidad de movimiento, de manera notable por lo que se producirán grandes cambios en la EA detectada. [2].

La EA depende fuertemente de los parámetros del ensayo y de la condición metalúrgica del material. Incrementar la velocidad de la deformación también incrementa la velocidad a la cual los eventos de EA ocurren, en general esto lleva a una proporcionalidad entre el valor cuadrático medio de la señal eléctrica de EA (valor RMS) y la raíz cuadrada de la velocidad de deformación plástica; pero bajo ciertas condiciones esto no se cumple. [2].

El trabajado en frío o en caliente del material previo al ensayo, generalmente reduce la EA. Probablemente esta reducción es causada por los siguientes factores:

- a) El trabajado previo activa fuentes que ya no actúan durante el ensayo.
- b) Se incrementa la densidad de dislocaciones con lo que se reduce la distancia de movimiento de las mismas.

La historia térmica previa del material también afecta el tamaño, distribución y morfología de los precipitados, inclusiones, y segundas fases. También afecta al tamaño de grano y a la densidad de dislocaciones. Cada uno de estos factores afecta la EA. [2].

Átomos de soluto pueden servir como trabas temporarias y por lo tanto favorecer la formación de avalanchas de dislocaciones e incrementar la EA. Bajo otras condiciones estos mismos átomos pueden reducir la velocidad de las dislocaciones y por lo tanto reducir la EA. Los precipitados que se forman durante el envejecimiento incrementan la EA durante la deformación en ciertas aleaciones pero la disminuyen en otras. Una disminución en la EA causada por estos

precipitados en general se atribuye a la reducción en la distancia de movimiento de las dislocaciones.

Un incremento en la EA debida a la presencia de precipitados es atribuido a que:

a) Los precipitados se comportan como trabas temporarias y por lo tanto incrementan la probabilidad de avalanchas de dislocaciones,

b) Los precipitados causan una localización de la deformación y una gran distancia de movimiento en las bandas de deslizamiento que resultan.

No está aún aclarado el efecto del tamaño de grano en la EA. Aparentemente la EA tiene un máximo para un dado tamaño de grano; pero este tamaño depende de la pureza de la muestra, el ancho de banda de la medición y de otros factores. [2].

1.2.2- MACLAS DE DEFORMACION

El deslizamiento y el maclado son los dos mecanismos fundamentales por los que se deforman plásticamente los metales. El deslizamiento es la traslación relativa de planos cristalográficos debido al movimiento de dislocaciones. La deformación por maclado difiere fundamentalmente de la anterior. Después del deslizamiento, las áreas deslizadas y no deslizadas, mantienen la misma orientación cristalográfica, mientras que las regiones macladas y no macladas tienen distinta orientación. El maclado se produce cuando una porción del cristal cambia su orientación original a otra relacionada con la de la zona no maclada de una forma simétrica. La región maclada es una imagen especular de la región original. El plano de simetría entre las dos porciones se llama plano de maclado. [3]

Hay otra diferencia fundamental entre deslizamiento y maclado: en el deslizamiento el movimiento atómico es en múltiplos del espaciado atómico, mientras que en el maclado los átomos se mueven mucho menos que una distancia atómica. El deslizamiento ocurre en planos separados, mientras que en la región maclada todos los planos atómicos se ven afectados. [3].

El proceso de maclado ocurre en tres etapas: nucleación de un embrión de macla, un rápido crecimiento del embrión en una macla observable en forma macroscópica y el ensanchamiento de la macla en forma perpendicular a su dirección de crecimiento. En general, la velocidad de ensanchamiento es mucho menor que la velocidad de crecimiento. [3].

La rápida deformación de corte debida al crecimiento de una macla es una fuente excelente de EA. El maclado del zinc fue una de las primeras fuentes de EA estudiadas. La energía liberada por el movimiento de una dislocación es proporcional al área atravesada, así la intensidad de la onda de EA producida por la fuente, esta relacionada tanto con la energía liberada, como con el tiempo que tarda en producirse dicha liberación. Debido a que una macla libera una energía significativa y lo hace en un lapso breve, es una fuente excelente de EA. [3].

Chen [14] combinó mediciones de EA con observaciones metalográficas, para encontrar una buena correlación de un evento de EA por macla formada durante la deformación por compresión de un bloque de zinc. Boiko [15] creó pequeñas maclas en circonio indentando la superficie con un indentador de microdureza. La formación de las maclas fue acompañada por eventos de EA; en

general se producía un evento por cada macla formada. Ocasionalmente había mas maclas que eventos, pero esto podría ser debido a que dos maclas se formaban simultáneamente y entonces sus eventos se superponían. No se producían eventos si no se formaban maclas. La conclusión de que un evento de EA se produce debido a la formación de una macla es apoyada por un conjunto de experimentos realizados por Takashima [16].

Chen [14] también observó que la EA producida por el ensanchamiento de la macla es significativamente mas pequeña en amplitud que la EA generada durante la nucleación inicial y el crecimiento. La amplitud mas pequeña de las señales de EA producidas durante el ensanchamiento de la macla es consistente con la velocidad mucho mas lenta de este proceso.

Debido a que la formación de una macla produce un evento de EA, cualquier factor que controle la velocidad de nucleación también controlara la velocidad de generación de eventos de EA. Los factores que influyen en la velocidad de nucleación de la macla son la velocidad de la deformación, la deformación, la temperatura, la estructura cristalina y pureza del material, el trabajado previo y la historia térmica previa. [3].

Haremos una pequeña reseña de cada uno de estos factores:

a) Velocidad de la deformación: en la mayoría de los metales, una variación de la velocidad de deformación cambia la proporción de deformación acomodada por el deslizamiento y el maclado. Incrementar la velocidad de deformación, en general incrementa la cantidad de maclas.

b) Temperatura del ensayo: bajar la temperatura del ensayo causa cambios similares a los producidos por un incremento en la velocidad de deformación, por lo que en general hay una probabilidad mayor de formación de maclas.

c) Impurezas en solución sólida y aleaciones: los efectos de la pureza de la muestra en la probabilidad del maclado han sido investigados y los resultados pueden ser clasificados en términos de la estructura del solvente y de si la impureza es sustitucional o intersticial. En general, solutos intersticiales incrementan la probabilidad del maclado mientras que los solutos sustitucionales la reducen.

d) Estructura cristalina: la estructura cristalina tiene un efecto sustancial en la probabilidad de formación de maclas. El maclado es mucho mas frecuente en estructuras menos simétricas. Esto es debido a que en las estructuras menos simétricas hay menos sistemas de deslizamiento y por lo tanto la tensión para el maclado es menor que para el deslizamiento para un gran rango de orientaciones del esfuerzo. Las bandas de Newman en acero fueron las primeras maclas mecánicas observadas en metales bcc. Desde entonces se han observado maclas en otros metales y aleaciones bcc. También se han observado maclas en metales y aleaciones fcc. Pero el maclado es mucho mas frecuente en la estructura hcp, que es menos simétrica. El valor de la relación c/a determina cuales son los sistemas de maclado que actúan en los metales hcp. Esto es debido a que la relación c/a determina el signo y magnitud de la deformación producida por una dada macla.

e) Trabajado mecánico previo: las observaciones indican que la probabilidad de maclado en muchos materiales puede ser reducida sustancialmente por una deformación previa aplicada a una temperatura superior. Cuando una muestra es

cargada, descargada y luego vuelta a cargar en la misma dirección que la carga original, la EA no se observa hasta que la nueva carga alcanza el valor máximo al que se había llegado anteriormente. Este comportamiento es conocido como efecto Kaiser.

f) Tratamientos térmicos: Hemos dicho que la probabilidad de maclado se reduce con un trabajado previo. En muchos metales el comportamiento original en lo referente al maclado se puede restituir mediante un envejecimiento.

g) Tamaño de grano y orientación preferencial: La tensión necesaria para formar una macla en un material dado se reduce a medida que el tamaño de grano aumenta, por lo que la EA se generara en un material con grano grande a una tensión aplicada menor. Cuando se forma inicialmente la macla, en general se propaga totalmente a través del grano. Así, se esperan eventos de EA de mayor amplitud en materiales de grano mas grande debido a que las maclas son más grandes. La textura cristalográfica u orientación preferencial tiene un efecto sustancial en la probabilidad de la formación de maclas. Se observaron resultados muy distintos en cuanto al maclado en hierro texturado y sin texturar.

1.2.3- FRACTURA Y DECOHESION DE INCLUSIONES

Desde hace muchos años se reconoce a las inclusiones y partículas de segunda fase como fuentes posibles de EA [18]. Es mas, bajo ciertos casos la fractura de inclusiones es la única fuente significativa de EA. La distinción entre inclusiones y partículas de segunda fase es de alguna forma arbitraria. Las inclusiones son impurezas de la aleación, mientras que las partículas de segunda fase son componentes que se buscan tener en una aleación. La mayoría de las inclusiones son compuestos, tales como sulfatos en aceros, y silicatos en aleaciones de aluminio. Estos compuestos son en general mas duros y frágiles que la matriz. Los precipitados responsables del endurecimiento en aleaciones endurecidas por precipitados, son una clase especial de partículas de segunda fase. Estos precipitados son pequeños en comparación con las inclusiones típicas. Los precipitados no son en general fracturados durante la deformación, pero aunque lo fuesen, su pequeño tamaño haría que la energía liberada por su fractura o decohesion fuese demasiado pequeña para ser detectada como EA. [3].

Debido a que las propiedades elásticas y plásticas de las inclusiones son en general bastante diferentes de las de la matriz, se producen dentro y cerca de las mismas sustanciales concentraciones de tensiones durante la deformación plástica. Si estas tensiones se hacen lo suficientemente grandes, ocurrirán tanto fractura de las inclusiones, como propagación de fisuras a lo largo de la interfase matriz-inclusiones (decohesion). Estos dos procesos corresponden a propagación frágil de fisuras y por lo tanto es de esperar que sean buenas fuentes de EA, aunque Jaffrey [17] ha mostrado que bajo ciertas condiciones pueden ocurrir fisuras y decohesión de inclusiones de MnS en aceros sin producir una EA significativa.

La situación es mas compleja que con el maclado (ver Sección 1.2.2). La formación de una macla produce un evento de EA; sin embargo la decohesión de una inclusión puede ocurrir en varias etapas y producir muchas señales de EA. Parece que la fractura de una inclusión produce un evento de EA, si bien pueden surgir muchos eventos a partir de múltiples fisuras en una inclusión. El estado de

tensiones y el modo de deformación son importantes en la decohesión y fractura de inclusiones. Una deformación tensil y tensión biaxial las favorecen. Una deformación de compresión tiene el efecto contrario. [3].
Resumiremos los distintos factores que influyen:

a) Temperatura del ensayo: trabajos realizados en aluminio 7075 muestran que el ensayo a temperatura elevada (90°-120°C) produce una disminución significativa en el número de eventos de EA en comparación con ensayos a temperatura ambiente, para el mismo incremento de la fisura.

b) Densidad de las inclusiones: varios experimentos llevados a cabo - Cousland y Scala [19],[20], Hamstad et al. [21], Ono et al.[22], demostraron que a mayor densidad de inclusiones se produce una mayor EA.

c) Tratamientos Térmicos: estos tratamientos se usan para cambiar la geometría de las inclusiones, lo que a su vez afecta la EA generada. Los tratamientos térmicos también afectan los precipitados de endurecimiento en sistemas que se endurecen por envejecimiento, lo que a su vez altera la EA producida de dos maneras:

i) Se produce un cambio en las características del movimiento de las dislocaciones,

ii) cambia la dureza de la matriz y se modifica la unión de las inclusiones a la misma, con lo que se modifica la EA producida por la fractura y/o decohesión de las mismas.

d) Tamaño y geometría: Ambos factores son importantes para determinar la EA generada. Cuanto mayor sea la inclusión, mayor será la energía liberada por su fractura y menor será la tensión necesaria para producir la misma. La geometría de la inclusión también puede tener un efecto importante en la EA producida por la fractura.

e) Tamaño de la muestra: Para muestras que tienen la misma densidad y distribución de inclusiones, un cambio en el volumen de la muestra producirá un cambio proporcional en el número de eventos producidos durante la deformación, siempre que no se cambien las otras variables.

1.2.4- FRACTURA

La formación de fisuras ocurre en las superficies o en puntos dentro del material donde la tensión local excede la tensión de fractura. La formación de la fisura crea nuevas superficies y así se libera energía de deformación, parte de la cual se transforma en señales de EA. Las señales de EA generadas por la formación de la fisura son del tipo discreto (burst) y frecuentemente son emitidas a una velocidad muy alta. [3].

Puede haber fricción en las fisuras y entre materiales adyacentes, y los súbitos mecanismos de deslizamiento liberan señales de EA de tipo discreto.

1.2.4.1- FISURA DUCTIL

Es posible esperar una abundante EA durante el crecimiento de la fisura a causa de los muchos sucesos de gran relajación de energía de deformación involucrados. Sin embargo, muchos estudios de la EA durante el crecimiento de una fisura dúctil revelan un amplio rango de actividad: algunos materiales emiten grandes cantidades de EA, pero otros no emiten casi nada [4].

Ingham et al.[23] ha realizado un estudio comparativo de la EA durante la propagación de una fisura en un amplio rango de aceros con tensiones de fluencia entre 230 y 1620 MNm⁻². La EA se incrementa al incrementarse la tensión de fluencia y al disminuir la ductilidad. Los aceros que sufren fractura dúctil pueden ser clasificados en dos categorías: en los aceros de baja resistencia, la mayoría de la emisión ocurre durante el periodo de expansión de la zona plástica, y los incrementos del avance de la fisura son lentos. En cambio, en los aceros de alta resistencia, mucha de la actividad ocurre durante el ultimo 20% del ensayo, y los procesos asociados con la expansión de la zona plástica ya no dominan la emisión. [4].

1.2.4.2- EXPANSION DE LA ZONA PLÁSTICA

La EA durante la expansión de la zona plástica en una probeta pre-fisurada, ha sido asociada con la fractura de inclusiones frágiles y/o su decohesión de la matriz, con fisurado de carburos y con procesos relacionados con las dislocaciones. Aun no se ha demostrado de forma concluyente que alguna de estas fuentes propuestas contribuya de manera notable a la EA durante esta etapa [4].

Durante el crecimiento de una fisura, la formación de nuevas superficies es acompañada por cambios repentinos tanto en las tensiones, como en los desplazamientos de material en la vecindad de la misma. Estas variaciones de tensiones y deformaciones actúan como fuentes de ondas elásticas. Este proceso se muestra en la fig 2 [1].

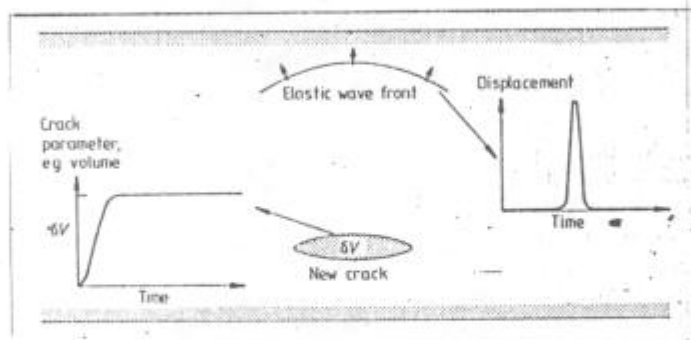


Fig. 2. Cuando se forma una fisura, sus dimensiones cambian bruscamente y esto es acompañado por un cambio local de tensiones que actúa como fuente de ondas elásticas [1].

Si la variación de la tensión es grande y rápida, de la fisura surgen ondas elásticas de amplitud grande que transportan una gran cantidad de la energía de la

fuelle. Este es el caso del crecimiento de una fisura frágil. En cambio, en el crecimiento de una fisura dúctil, la mayor parte de la energía va a las dislocaciones asociadas con la zona plástica de la fisura. Esto disminuye la velocidad de propagación de la misma e impide que se propague de manera catastrófica, la punta de la fisura es rápidamente redondeada. En este tipo de fisura hay mucha menos energía disponible para ser radiada como EA. Scruby [24] ha demostrado que es la velocidad de liberación de energía, es decir la velocidad de avance de la fisura, mas que la cantidad de energía liberada lo que controla la amplitud de la señal de EA. Esto confirmaría que el crecimiento de una fisura frágil sería fácilmente detectable, mientras que lo contrario ocurriría con una fisura dúctil, a menos que también haya otros factores involucrados como la amplificación debida a una prefisura grande, o a menos que el incremento de la fisura sea muy grande (ver fig.3)

La deformación plástica que absorbe energía de la onda elástica puede a su vez producir fuentes adicionales de EA que pueden ser detectadas, aunque el crecimiento de la fisura dúctil sea silencioso. El mecanismo más probable es la fractura de inclusiones o su decohesión de la matriz cuando la zona plástica pasa a través de ellos [1].

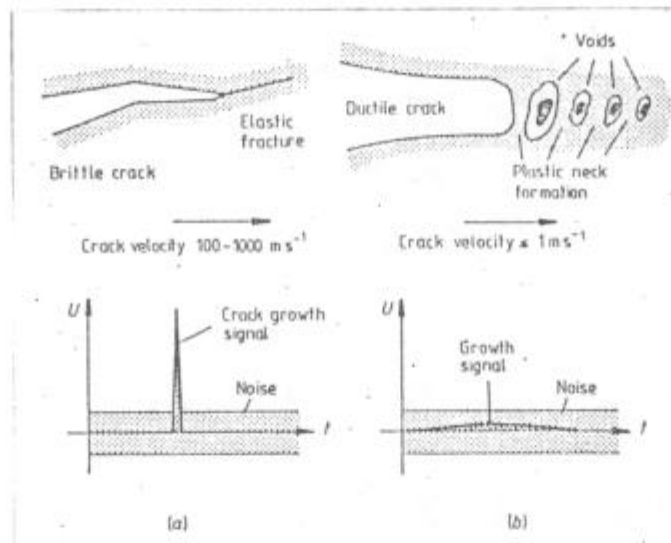


Fig. 3. (a) El avance de una fisura frágil genera señales detectables (b) El avance de una fisura dúctil puede no ser detectable [1].

Hay varios factores que pueden contribuir a que una fisura sea "más ruidosa" en dispositivos industriales y que no se encuentran en las probetas ensayadas en los laboratorios [1]:

i) Defectos preexistentes que actúan como resonadores, que potencian las señales que surgen de la punta de la fisura y que amplían la EA.

ii) Regiones de baja dureza y composición diferente, por ejemplo debido a soldaduras o tratamientos térmicos, pueden ser propensas a crecimiento de fisuras frágiles y a EA de mayor amplitud.

iii) Efectos ambientales que pueden causar corrosión o fragilidad, fenómenos que tienden a incrementar la EA.

Todos estas fuentes están directamente asociadas con la acumulación de daño en el material. Se conocen como fuentes "primarias". Fisuras grandes también pueden generar EA bajo carga de fatiga por el rozamiento entre ambas superficies. Estas clases de fuentes son conocidas como fuentes "secundarias", puesto que no implican avance de la fisura. Un ambiente corrosivo aumentará la emisión secundaria al producir productos de corrosión frágiles que crecerán entre las superficies móviles de la fisura (ver Fig. 4) [1].

El daño en los materiales y los procesos de degradación tales como el crecimiento de una fisura tienden a actuar como fuentes de ondas elásticas discretas de corta duración ($<1\mu s$), con componentes desde continua o muy baja frecuencia hasta 1 o 10 MHz o aún más. (es decir son señales de banda ancha). Esto mismo se aplica a algunos procesos reversibles como transformaciones de fase, incluyendo las transformaciones martensíticas. [1].

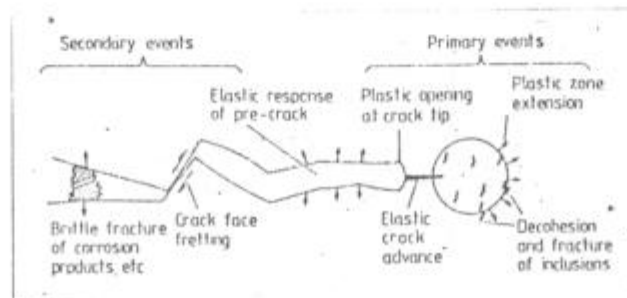


Fig. 4. Fuentes primarias y secundarias de EA. [1]

1.3- ONDAS ACUSTICAS

La relación entre la fuente y la señal de EA generada por el sensor es la onda acústica que se propaga. La mayor parte de la complejidad en las señales de EA se genera a medida que la onda viaja a través del material. Para entender las señales de EA es necesario conocer las características de las ondas acústicas. Para ello hay que empezar conociendo las propiedades del medio a través el cual se propagan las ondas:

Todos los materiales son arreglos de átomos. Los átomos se mantienen unidos por fuerzas atractivas pero también existen fuerzas repulsivas de corto rango que impiden que se aproximen demasiado. La superposición de estas fuerzas resulta en una posición de equilibrio del átomo en la que tiene su mínima energía y por lo tanto es la configuración más estable. Sin embargo, solo a una temperatura de cero absoluto los átomos estarían en reposo en estas posiciones de equilibrio. Al incrementarse la temperatura, los átomos ganan cierta energía y realizan oscilaciones alrededor de sus posiciones de equilibrio. La energía cinética de los átomos es energía térmica. La relación entre la magnitud de la energía térmica y la intensidad de las fuerzas atractivas determinan si el material es un sólido, líquido o

gas. En los sólidos, las posiciones de equilibrio retienen una relación geométrica fija entre ellas. La geometría de esta relación determina la estructura cristalina del sólido [6].

A causa de las fuerzas entre átomos, el movimiento de los átomos adyacentes debe estar acoplado de alguna manera. Este acople permite la transferencia de energía cinética entre ellos. Para las componentes de mayor energía (alta frecuencia) de este movimiento atómico, el acople es débil y la correlación entre los movimientos atómicos se extiende solo a los vecinos cercanos. Este tipo de movimiento correlacionado de corto rango, da como resultado una transferencia de energía básicamente difusiva en el material y se conoce como conducción térmica. Sin embargo, para movimientos atómicos de muy baja frecuencia el acople se puede extender sobre muchos átomos. Este movimiento correlacionado de largo rango es una onda acústica [6].

Las correlaciones de rango largo en una onda acústica resultan en muchos átomos en una pequeña región que se desplazan en la misma dirección a partir de sus posiciones de equilibrio. Este desplazamiento es una deformación local en el cristal. La deformación es dinámica porque su dirección y magnitud están cambiando constantemente al moverse los átomos. Como el movimiento atómico es pseudo-oscilatorio, también lo es la deformación. Así, una onda acústica es una deformación oscilatoria moviéndose a través de un material. Debido a que la deformación y el esfuerzo están siempre relacionados en un material, hay también un campo de esfuerzo oscilatorio. Por lo tanto una onda acústica puede ser descrita ya sea como un campo dinámico de esfuerzos o un campo dinámico de deformaciones en el material. [6].

1.3.1- MOVIMIENTO DE LAS ONDAS

La descripción más familiar de una onda es una curva sinusoidal tal como muestra la figura 5:

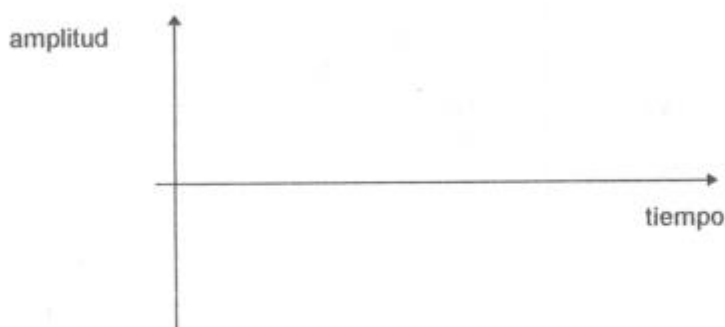


Fig.5. Onda senoidal

La amplitud oscila entre límites positivos y negativos a un ritmo fijo, conocido como frecuencia, y la curva se extiende indefinidamente. Esta onda puede ser graficada tanto en función del espacio como del tiempo. En un material, la onda

tiene tanto una componente espacial como temporal. Una ecuación para la curva puede ser:

$$Y = A_0 \sin(\omega t - kx)$$

Donde A_0 es la amplitud, ω es 2π veces la frecuencia ν y k es 2π dividido la longitud de onda λ . La relación entre estos parámetros es:

$$v = \lambda \nu$$

La onda descrita en la ecuación se propaga solo en una dirección. En tres dimensiones, el frente de onda, que es una superficie de fase constante para la onda, es un plano perpendicular al eje x . Tal onda se conoce como onda plana. La mayoría de las ondas que se originan en un punto en un medio extenso, inicialmente tienen un frente de onda esférico. Sin embargo, a una gran distancia desde el punto de origen, la superficie esférica se aproximará sobre un área pequeña a un plano. En el siguiente análisis consideraremos ondas planas.

Cualquier función arbitraria que no contiene una discontinuidad de salto infinito puede ser representada por una suma infinita de senos conocida como serie de Fourier. Esta serie se puede escribir como:

$$f(t) = A_0/2 + \sum A_n \sin(n \omega_0 t + \alpha_n)$$

Donde A son las amplitudes de los senos y α_n las fases. La señal representada puede no ser permanente, es decir puede ser representada una onda transitoria.(utilizando la transformada de Fourier). Un método muy útil de analizar una onda es estudiar sus componentes de frecuencia. [6].

1.3.2. CARACTERISTICAS DEL MATERIAL

Una onda acústica puede existir tanto en un sólido como en un líquido como en un gas. Su velocidad esta determinada por las características del mismo. Cuanto mayor sea la fuerza entre los átomos vecinos más acoplado será su movimiento. Por otra parte, cuanto mayor sea la masa de los átomos, una fuerza más grande debe ser aplicada para lograr la misma aceleración. Porque una onda es un movimiento sincronizado de un número grande de átomos, es la densidad del material ρ lo que gobierna el movimiento de la onda. La velocidad de la onda debe ser directamente proporcional a la fuerza restauradora atómica e inversamente proporcional a la densidad es decir:

$$v = (C / \rho)^{1/2}$$

donde C es la constante elástica, que es una medida de la fuerza del acople entre átomos para una clase dada de movimiento (esta ecuación es válida para medios isotropos homogéneos y en el caso de ondas longitudinales). Movimientos relativos distintos de los átomos tendrán una constante elástica distinta. [6].

1.3.3- TIPOS DE ONDAS ACUSTICAS

El camino recorrido por una partícula bajo la influencia de una onda acústica puede ser representado generalmente por una elipse con uno de sus ejes orientado hacia la dirección de viaje de la onda. El tipo de onda queda determinado por la relación entre el movimiento de la partícula y la dirección de viaje de la onda.

Las ondas que viajan a través de un medio extenso (uno cuyas dimensiones son mucho más grandes que la longitud de onda de la señal) se llaman ondas de volumen. Hay dos tipos de estas ondas: longitudinales (compresión) y transversales (de corte). En ambos casos, el eje menor de la elipse se hace cero, con lo que se obtiene un movimiento lineal oscilatorio. Las ondas longitudinales son ondas donde este movimiento es paralelo a la dirección de la propagación de la misma mientras que en las ondas de corte el movimiento es perpendicular a la dirección de propagación. Ambos tipos de onda se ilustran en la fig 6

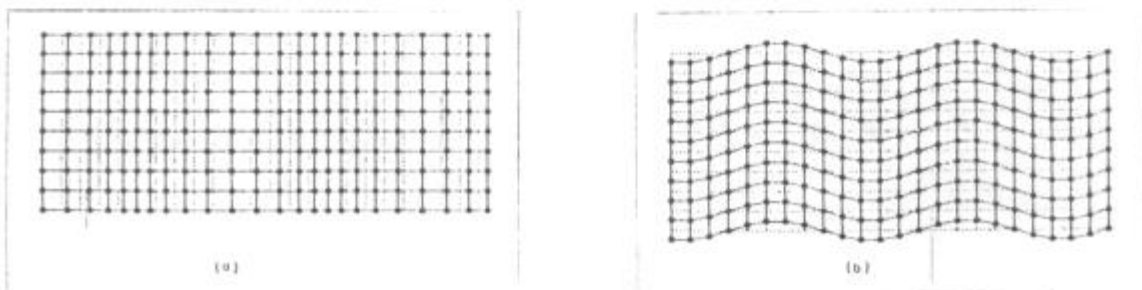


Fig.6. Desplazamientos de las partículas para:(a) Ondas longitudinales (b) Ondas transversales [6]

Como los movimientos relativos de las partículas son diferentes, también lo son las constantes elásticas y por consiguiente las velocidades. Generalmente la velocidad de la onda de corte es ligeramente superior que 1,5 veces la de la onda longitudinal. Las ondas acústicas frecuentemente tienen componentes longitudinales y transversales, pero cada componente viaja a su velocidad, por lo que, en un medio sin atenuación y sin dispersión, una onda transitoria, tomada a una cierta distancia de su punto de origen, puede aparecer como dos ondas separadas, una longitudinal y otra transversal. Esto se ve en la fig. 7.

La anisotropía de las fuerzas de acople entre los átomos en la superficie de un sólido puede producir tipos adicionales de ondas. Una onda de superficie tiene su amplitud máxima en la superficie del sólido y ésta va decreciendo a medida que aumenta la distancia a la superficie. El plano de la elipse de movimiento de la partícula, puede ser paralela (ondas de Love) o perpendicular (ondas de Rayleigh) a la superficie, pero ya que la mayoría de los sensores de EA detectan movimientos perpendiculares a la superficie, rara vez se puede detectar la componente paralela a la misma. La velocidad de la onda de Rayleigh es ligeramente inferior que la de la onda de corte [6].

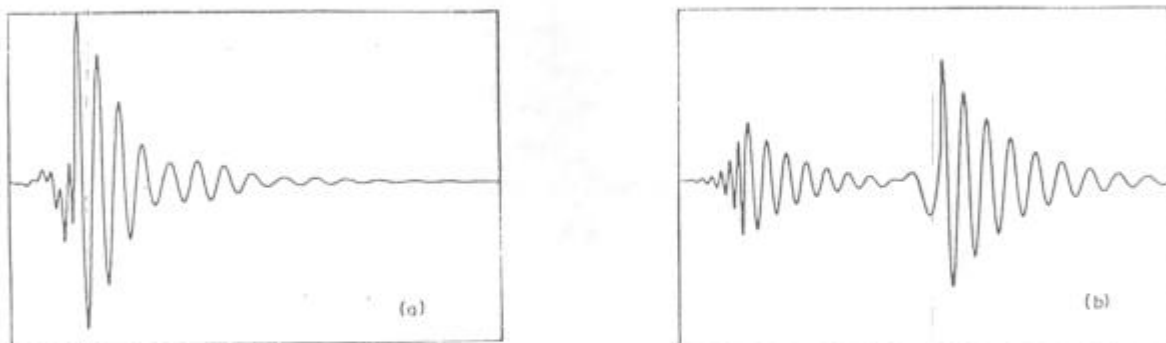


Fig. 7. (a) Ondas longitudinal y de corte cerca del punto de origen (b) Las mismas ondas lejos del punto de origen. Se han ignorado los efectos de la atenuación y de la dispersión [6].

Si el sólido está limitado por dos superficies, de tal manera que es una lámina y el espesor es del orden de unas cuantas longitudes de onda, pueden aparecer ondas de Lamb. Estas ondas son esencialmente dos ondas de superficie sincronizadas, que pueden estar sincronizadas ya sea simétricamente o antisimétricamente. En la fig 8 se muestran los movimientos de las partículas en las ondas de Rayleigh y de Lamb.

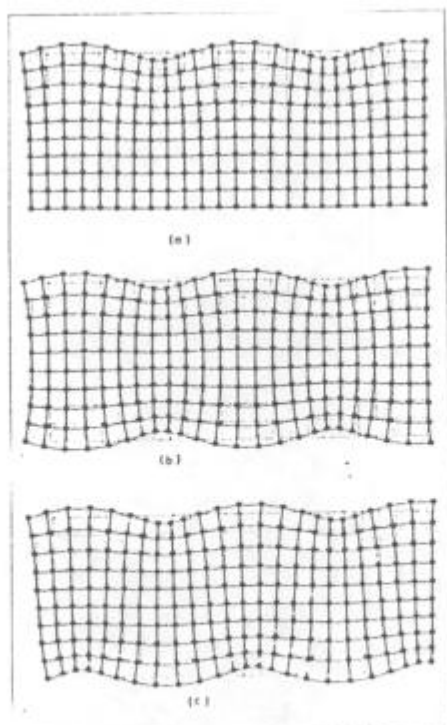


Fig. 8. (a) Ondas de Rayleigh (b) Ondas de Lamb simétricas (c) Ondas de Lamb antisimétricas [6]

Las ondas de volumen, de superficie y de Lamb son los tipos más importantes de ondas que se ven en el campo de la EA, pero no son los únicos. [6].

1.3.4- DISPERSION.

Toda onda que viaja en un medio acotado, donde las dimensiones físicas están dentro del orden de magnitud de la longitud de onda, sufren la dispersión; esto es, la velocidad de fase es función de la frecuencia. La EA son paquetes de ondas que pueden pensarse como una superposición de ondas continuas, si cada componente viaja a una velocidad distinta, el paquete puede cambiar de forma a medida que viaja por el material. El resultado es que la misma EA puede verse completamente diferente cuando es detectada por el sensor en distintas posiciones. [6].

1.3.5- ATENUACION

Un paquete de ondas se genera con una energía bien definida. A medida que el paquete se propaga, el contenido de energía debe conservarse, en ausencia de mecanismos disipativos, pero al expandirse el frente de onda, la energía por unidad de volumen debe disminuir para que la energía total se conserve.

La atenuación de una onda plana surge de mecanismos disipativos a medida que la onda se propaga. En un medio homogéneo, estas pérdidas son un cierto porcentaje de la energía. Matemáticamente esto es un decrecimiento exponencial de la amplitud con la distancia, y puede expresarse como:

$$A = A_0 \exp (-\alpha x)$$

donde α es la constante de atenuación por unidad de longitud.

Hay muchos mecanismos de atenuación y la mayoría dependen de la frecuencia. Afortunadamente en el rango normal de la EA (entre 50Hz y MHz), y en materiales estructurales, tanto la dependencia con la frecuencia como la magnitud de estos mecanismos es pequeña [6].

1.4- SENSORES

Un sensor es un dispositivo que genera una señal eléctrica cuando es estimulado por una onda acústica. La relación entre las características de la señal eléctrica y la onda acústica dependen tanto del sensor como de la onda acústica. un sensor ideal produciría una curva voltaje-tiempo idéntica a la curva amplitud-tiempo de la onda en el punto donde está localizado el sensor. Ningún sensor logra esto de manera absoluta, pero muchos sensores operan bien para un determinado tipo de onda y bajo determinados parámetros de trabajo. A causa del amplio rango de frecuencias y los diferentes modelos acústicos contenidos en la mayoría de las señales de EA, la elección de un sensor en general no es crítica para detectar la EA. Sin embargo, la elección óptima de un sensor siempre mejorará los datos y puede ser la diferencia entre un ensayo exitoso o no, especialmente si la EA tiene una amplitud baja [6].

El tipo más común de transductor está basado en el efecto piezoeléctrico. Los transductores piezoeléctricos son sensibles, fáciles de utilizar, baratos y ya están establecidos tanto en el campo de la EA como del ultrasonido. Trabajan mejor cuando están en contacto íntimo con la muestra, lográndose un buen acople mediante el uso de grasa u otro fluido no atenuante [1].

La piezoelectricidad es la vinculación entre el esfuerzo y la polarización eléctrica que se da en muchos cristales. Es un efecto geométrico y ocurre sólo en materiales que carecen de un centro de simetría. Pero dado que 21 de las 32 clases de cristales carecen de un centro de simetría, esta no es una restricción muy grande [6].

En estos cristales, un esfuerzo desplaza los centros de la distribución de cargas positivas y negativas de tal manera que no coincidirán. Esto produce un momento dipolar eléctrico a través del cristal. La polarización de un cristal es el momento dipolar por unidad de volumen. Cuando la polarización ocurre en un cristal no conductivo, aparecen cargas eléctricas en ciertas superficies; si se conectan hilos conductores a esas superficies, se puede medir la carga que es proporcional al esfuerzo. De la misma forma, la aplicación de cargas a los hilos cambia el esfuerzo. Como en un material están relacionados los campos de tensiones y de deformaciones, se puede definir al efecto piezoeléctrico como la vinculación entre la deformación y la polarización [6].

Inicialmente todos los dispositivos piezoeléctricos eran cristales. Más tarde se investigaron los materiales ferroeléctricos (materiales piezoeléctricos que tienen polarización aún en ausencia de esfuerzo), y se encontraron métodos mediante los cuales es posible darle a cerámicos ferroeléctricos una dirección uniforme de polarización, similar a la de los cristales piezoeléctricos. Luego fue posible producir cerámicos ferroeléctricos, con propiedades superiores a la de los cristales. El resultado es que casi todos los sensores de EA son hechos de cerámicos ferroeléctricos de varios tipos [6].

Hay dos tipos principales de sensores, de banda ancha y resonantes. Los de banda ancha pueden ser usados para análisis espectral, aunque debe tenerse cuidado con las resonancias. Sin embargo la mayoría del trabajo de EA se lleva a cabo usando sensores resonantes. Esto tiene la doble ventaja de una sensibilidad mayor combinada con un ruido de fondo más reducido debido a la operación en un ancho de banda más angosto [25].

La mayoría de los transductores piezoeléctricos usados para la EA, tienen el elemento sensible en la forma de un disco de material piezoeléctrico, que es frecuentemente titanato circonato de plomo (PZT). Si al disco no se le da un respaldo rígido, o se lo amortigua de alguna forma, actúa como un resonador para las ondas incidentes, de tal forma que la fuerza electromotriz de salida es típicamente una senoidal que decae, y cuya frecuencia principal está determinada por el espesor del elemento. Hay también resonancias radiales a frecuencias más bajas. Respaldo al elemento con un medio atenuante como epoxi, produce un transductor fuertemente amortiguado con una respuesta de más banda ancha [1].

Las frecuencias elegidas para la mayoría de los transductores resonantes de EA están en el rango de 100kHz a 1 MHz. Estos son los mejores para muestras cuyo espesor está entre unos pocos milímetros y fracciones de metro, porque el espesor controla la resonancia de la muestra y las frecuencias dominantes de las ondas de Lamb. Cuando hay que elegir un transductor, es muy ventajoso optimizar la sensibilidad, haciendo coincidir las frecuencias. Los transductores de banda ancha de EA, frecuentemente comprenden un piezoeléctrico cuya frecuencia de

resonancia natural está en el extremo superior o encima de la banda de paso de interés. Así para un monitoreo en el rango de 100kHz a 1MHz, debería ser elegida una frecuencia entre 1 y 2 Mhz [1].

Una desventaja con el uso de un disco es que tiende a mantener su respuesta de banda ancha sólo para ondas que inciden en forma perpendicular a su cara. La interferencia destructiva distorsiona la respuesta y reduce el ancho de banda para otras orientaciones. Este efecto es insignificante a frecuencias más bajas, a menos que el transductor sea muy grande (la longitud de onda de ondas de Rayleigh en acero a 100kHz es de 30mm) [1].

Normalmente es ventajoso emplear un transductor resonante para mejorar la sensibilidad. Solo hay una ganancia significativa, si el ancho de banda de la señal es mucho menor que el ancho de banda del ruido. Cuando tanto el ruido como la señal de EA, son de banda ancha hay muy poca ganancia. Se seleccionan transductores de banda ancha cuando se desea realizar un análisis de forma de onda.

Los eventos de EA aparecen como señales aleatorias sobre un nivel de ruido de fondo. El éxito de la técnica reside, en parte, en minimizar el ruido de fondo, ya sea electrónico o acústico. Así deberían ser usados materiales piezoeléctricos con una alta sensibilidad intrínseca, junto a amplificadores de bajo ruido, y también debe tratarse de aislar, tanto como sea posible, el experimento del ruido acústico ambiente y de la interferencia electromagnética. La etapa más crítica en la amplificación es la primera etapa del preamplificador, al cual el transductor está conectado. Debe ser de bajo ruido y conectado al transductor tan cerca como sea posible (no mas de 50cm).

Si simplemente se coloca el sensor sobre la superficie del material por el cual se está transmitiendo la onda, la señal producida por el mismo será muy débil. Si se coloca entre el sensor y la superficie una capa fina de fluido, se obtiene una señal mucho mayor. Así, el uso de algún acoplante es esencial para la detección de ondas acústicas de nivel bajo. Esto se puede entender pensando que la onda acústica es una onda de presión que se transmite a través de superficies en contacto. En una escala microscópica, las superficies del sensor y del material son bastantes rugosas de tal forma que están en contacto solo en algunos lugares. El esfuerzo es fuerza por unidad de área y el área a través de la cual se transmite es muy pequeña. Si los espacios microscópicos se llenan de fluido, la presión será transmitida uniformemente entre las superficies. El propósito de un acoplante es asegurar un buen contacto entre dos superficies a nivel microscópico. [1].

1.5- PRINCIPIOS DE INSTRUMENTACION

Durante un ensayo de EA, los sensores en la probeta producen una serie de señales. Una señal debida a un proceso de deformación único y discreto es conocida como un evento (o burst) de EA. Este tipo de señales varían mucho en cuanto a forma, tamaño, tiempo de ocurrencia, dependiendo de la estructura y las condiciones del ensayo. Si hay una gran frecuencia de ocurrencia, los eventos individuales se combinan para dar lugar a una emisión continua. En algunos casos una inspección de EA se basa en la detección de una emisión continua [5].

Los instrumentos utilizados en una inspección de EA deben ser capaces de detectar emisiones continuas o discretas. También deben cumplir otros requerimientos:

1- El instrumental debe proveer alguna medida de la cantidad total de la emisión detectada para la correlación con el tiempo y/o la carga .

2- El sistema en general necesita proveer cierta información estadística de las señales de EA detectadas para un diagnostico más detallado de los mecanismos de la fuente.

3- Muchos sistemas pueden localizar la fuente de los eventos de EA comparando los tiempos de arribo de la onda a los distintos sensores.

4- El sistema debería proveer un medio de discriminar entre señales de interés y ruido debido a fricción, impacto, e interferencia electromagnética.

1.5.1- DETECCION Y CONTEO DE LA SEÑAL

Después de ser sensada y amplificada, la señal se transmite al instrumento principal, donde es vuelta a amplificar y es filtrada. Luego viene la etapa critica de detectar la señal. Esto se realiza con un circuito comparador, que emite un pulso digital cada vez que la señal de EA sobrepasa un voltaje de umbral fijo. La relación entre la señal, el umbral y los pulsos se muestra en la fig 9.

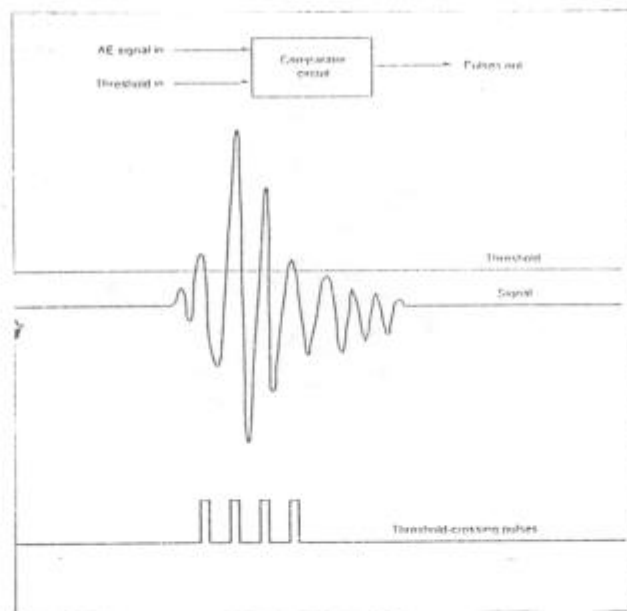


Fig. 9. Relación entre la señal, el umbral y los pulsos [5]

El nivel del umbral es en general establecido por el operador. Esta es una variable clave que determina la sensibilidad del ensayo. Dependiendo del diseño del equipo, la sensibilidad también se puede controlar ajustando la ganancia del amplificador.

Una de las maneras más antiguas y simples de cuantificar la actividad de EA es contar los pulsos de cruces de umbral generados por el comparador. Estas cuentas se pueden graficar como función del tiempo o la carga, ya sea como el total acumulativo o en la forma de un histograma. Los equipos basados en hardware de la primera parte de los 70 graficaban esto en graficadores X-Y, y mucha de la literatura sobre EA de esos años presenta los resultados en esta forma [5].

En la última parte de los 70 los equipos basados en hardware fueron reemplazados por sistemas basados en computadoras. Las computadoras se utilizaron por primera vez en los 70, en equipos multicanal de localización de fuentes, pero luego se emplearon para propósitos más generales como almacenamiento, análisis y presentación de datos. Al mismo tiempo, comenzó el interés por otras características de los eventos de EA además de las cuentas de cruce del umbral [5].

Estas tendencias condujeron a un nuevo concepto de instrumentación, que implica la medición de parámetros claves de cada señal que cruza el umbral. Una descripción digital de cada evento se genera en el hardware del equipo, y es enviado a una computadora que provee el almacenamiento de datos, una variedad de gráficos y la posibilidad de repetición de la señal para un análisis posterior al ensayo [5].

Un diagrama en bloques genérico se presenta en la fig. 10.

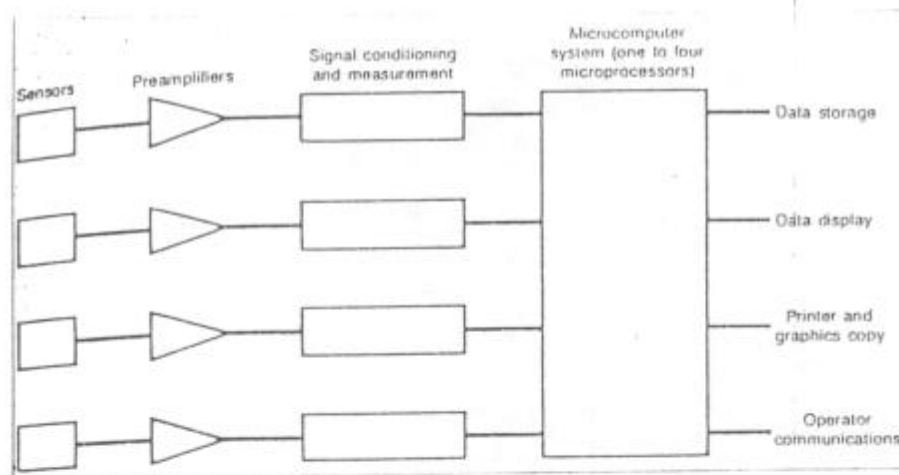


Fig. 10. Diagrama en bloques [5]

Los sistemas multicanal más modernos dividen las tareas de procesamiento de datos entre varios microprocesadores. Por ejemplo, puede haber un microprocesador para cada canal de medición. La principal prioridad para este micro es leer los resultados de cada medición de la señal tan pronto como el proceso de medición se completa, de tal manera que el circuito quede listo para la próxima medición [5].

1.5.2- PARAMETROS DE LA MEDICION DE LA SEÑAL

Los cinco parámetros más usados son: Cuentas, Amplitud, Duración, Rise time y el área bajo la envolvente de la señal. Todos ellos se ven en la fig. 11.

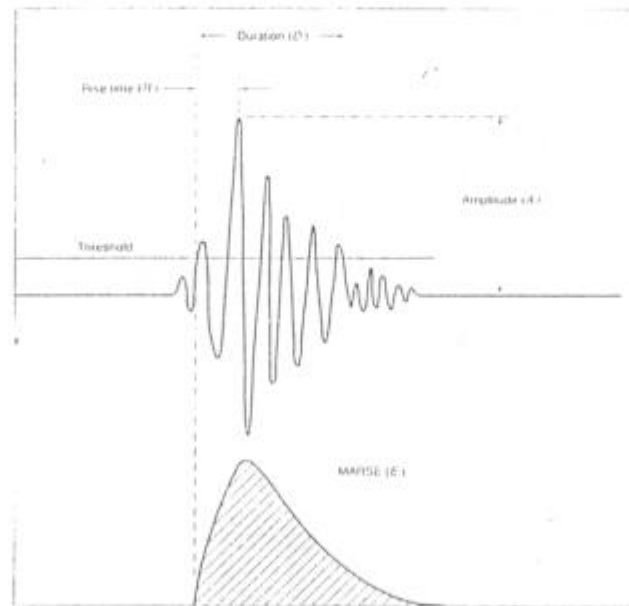


Fig. 11. Principales parámetros de la señal de EA [5]

Además de estos parámetros la descripción del evento también incluye importantes variables externas como tiempo de detección, el valor de la carga aplicada, y el ciclo si se trata de un ensayo de fatiga.

AMPLITUD: A, es el voltaje pico más elevado en la señal. Es un parámetro muy importante porque determina directamente la detectabilidad del evento de EA. Las amplitudes de EA están directamente relacionadas con la magnitud del suceso fuente, y varían de los microvolts a varios volts. De todos los parámetros medidos, la amplitud es el más adecuado para desarrollar información estadística en la forma de funciones de distribución.

CUENTAS: N, son los pulsos de cruce de umbral, (algunas veces llamados ring-down). Esta es la forma más antigua y más fácil de cuantificar una señal de EA. Las cuentas dependen de la magnitud del suceso fuente, pero también dependen de las propiedades acústicas del material y del sensor.

AREA DE ENVOLVENTE: E, es el área medida bajo la envolvente de la señal rectificada. Como una medida de la magnitud de la señal de EA, esta cantidad ha ganado aceptación y está reemplazando a las cuentas para muchos propósitos. Aún cuando el circuito es más complejo, se prefiere a las cuentas porque es sensible tanto a la amplitud como a la duración y depende menos del nivel del umbral.

DURACION: D, es el tiempo transcurrido entre el primer cruce del umbral y el último. Se mide en microsegundos y depende de la magnitud del suceso fuente, la acústica de la estructura, y la reverberación.

RISE TIME: R, es el tiempo transcurrido entre el primer cruce del umbral y el pico de la señal. Está gobernado por los procesos de propagación de la onda entre la fuente y el sensor. Este parámetro puede ser útil para varios tipos de cuantificación de la señal.

1.5.3- PRESENTACION DE LOS DATOS

Un sistema de EA basado en software puede producir una serie de gráficos. En una forma amplia podemos dividir los gráficos en:

- i) Histogramas que muestran el curso del ensayo de principio a fin.
- ii) Funciones de distribución que muestran propiedades estadísticas de la emisión.
- iii) Gráficos de canal que muestran la distribución de las emisiones captadas por canal.
- iv) Mapas de localización que muestran la posición de las fuentes de EA
- v) Gráficos que muestran la correlación entre diferentes parámetros de EA
- vi) Gráficos de diagnósticos que muestran las indicaciones de EA desde diferentes partes de la estructura.

Algunos de estos gráficos se muestran en la fig. 12.

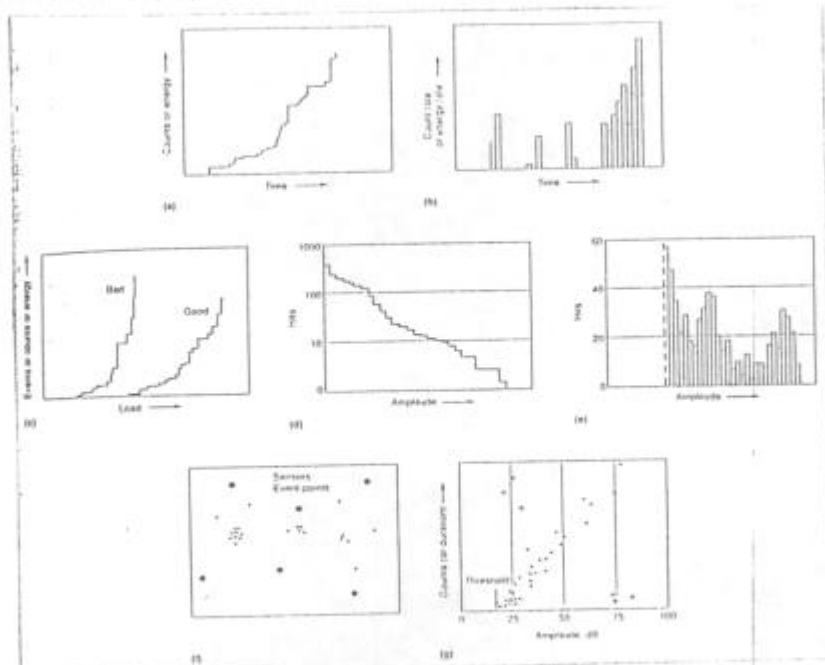


Fig. 12. Gráficos de datos de EA [5]

Las figuras 12(a) y (b) muestran histogramas de datos de EA contra el tiempo en forma acumulativa y como velocidad de producción de eventos. Un gráfico acumulativo es la forma más conveniente de presentar cuantitativamente la emisión total, mientras que un gráfico de velocidad de producción destaca los cambios en la actividad que ocurren durante el ensayo.

La figura 12(c) es un histograma de la EA en función de la carga. Este es el gráfico más importante pues vincula directamente causa con efecto. Este tipo de gráfico es especialmente útil para separar componentes mecánicos buenos de malos. Malos componentes comienzan a emitir a cargas más bajas y emiten más a una cierta carga dada.

Las figuras 12(d) y (e) muestran respectivamente las formas acumulativas y diferenciales de la función de distribución de la amplitud. El eje X muestra amplitud, y el eje Y muestra cuantos eventos tienen esa amplitud (forma diferencial) o cuantos la exceden (forma acumulativa). La distribución de amplitud diferencial (fig. 12e) es útil para distinguir entre mecanismos de deformación y para observar cambios en la intensidad de EA a medida que el ensayo avanza. La forma acumulativa (fig. 12d) es más útil para el modelado cuantitativo y para verificar como la detectabilidad de la EA es afectada por cambios en la sensibilidad del ensayo.

La figura 12(f) es un gráfico de localización planar. Es básicamente un mapa de la estructura, con la localización computada de cada evento indicada como un punto en la posición adecuada. La ubicación de los sensores se indican como puntos grandes proveyendo un marco de referencia.

La figura 12(g) es un gráfico de cuentas (o duración) versus amplitud. Cada evento se muestra como un punto en el gráfico y su posición da información sobre el tamaño y la forma de la señal. Este tipo de gráfico es útil para la evaluación de la calidad de los datos, específicamente para identificar tipos comunes de ruidos no deseados. La EA de fuentes impulsivas forma típicamente una banda diagonal que corre a través del gráfico. [5].

1.6- CARACTERIZACION DEL MATERIAL

Las vainas combustibles tipo CANDU son de Zircaloy-4, que es una aleación del circonio. A continuación se enuncian algunas propiedades básicas de estos materiales.

1.6.1- HISTORIA

El circonio fue descubierto en 1824 por Berzelius. En 1925 Van Arkel y De Boer desarrollaron un proceso para refinar circonio y así producir "barras cristalinas" de circonio de alta pureza. Este fue el primer material de circonio que tuvo buena ductilidad. Las principales propiedades físicas se dan en la tabla I.

TABLA II
PROPIEDADES FISICAS DEL CIRCONIO

NUMERO ATOMICO	40
PESO ATOMICO	91.2
DENSIDAD	6.6 Mg.m ⁻³
TEMPERATURA DE FUSION	2125 K (1850 °C)
TEMPERATURA DE TRANSICION $\alpha \rightarrow \beta$	1135K (862 °C)
COEFICIENTE DE EXPANSION TERMICA	5.14 x 10 ⁻⁶ °C dirección (100) 9.21 x 10 ⁻⁶ °C dirección (001)
CALOR ESPECIFICO	0.066 cal/g. °C
CONDUCTIVIDAD TERMICA A 100K	0.050 cal/cm. s
MODULO DE YOUNG A 300K	0.96 x 10 ¹² dina cm en la dirección (100) 1.25 x 10 ¹² dina cm en la dirección (001)
COEFICIENTE DE POISSON	0.35
PARAMETROS DE LA RED	hexagonal α $a_0 = 3.23$ Å bcc β $a_0 = 3.59$ Å

Los reactores CANDU producen energía eléctrica de manera económica al utilizar uranio natural como combustible, y materiales estructurales que tienen una sección eficaz pequeña para los neutrones térmicos. Las aleaciones de circonio tienen una absorción de neutrones por unidad de longitud mucho menor que la de otros materiales estructurales disponibles comercialmente, con la sola excepción del

berilio, que no es adecuado para aplicaciones nucleares. De aquí que se utilicen las aleaciones del circonio para los componentes de los reactores nucleares [11].

1.6.2- ALEACIONES

Las aleaciones comerciales más comunes son Zircaloy-2, Zircaloy-4, Zr-1 wt% Nb y Zr-2.5 wt% Nb, que tienen como elementos de aleación más comunes el estaño, el niobio y el oxígeno. El estaño y el oxígeno estabilizan la fase α , el niobio estabiliza la fase cúbica β . La composición típica del Zircaloy-4 se da en la tabla III [11].

TABLA III
COMPOSICION TIPICA DEL ZIRCALOY-4

ELEMENTO	ZIRCALOY-4
ESTAÑO	1.20 - 1.70 wt%
HIERRO	0.18 - 0.24 wt%
CROMO	0.07 - 0.13 wt%
NIQUEL	-
NIOBIO	-
OXIGENO	1400 ppm máximo
RESTO DE LA COMPOSICION	Circonio más impurezas

1.6.3- FABRICACION DE TUBOS DE ZIRCALOY

Las operaciones principales en la producción de vainas de Zircaloy (Zry) desde esponja, de acuerdo a la información suministrada por CONUAR S.A. [10], se ven en la figura 13.

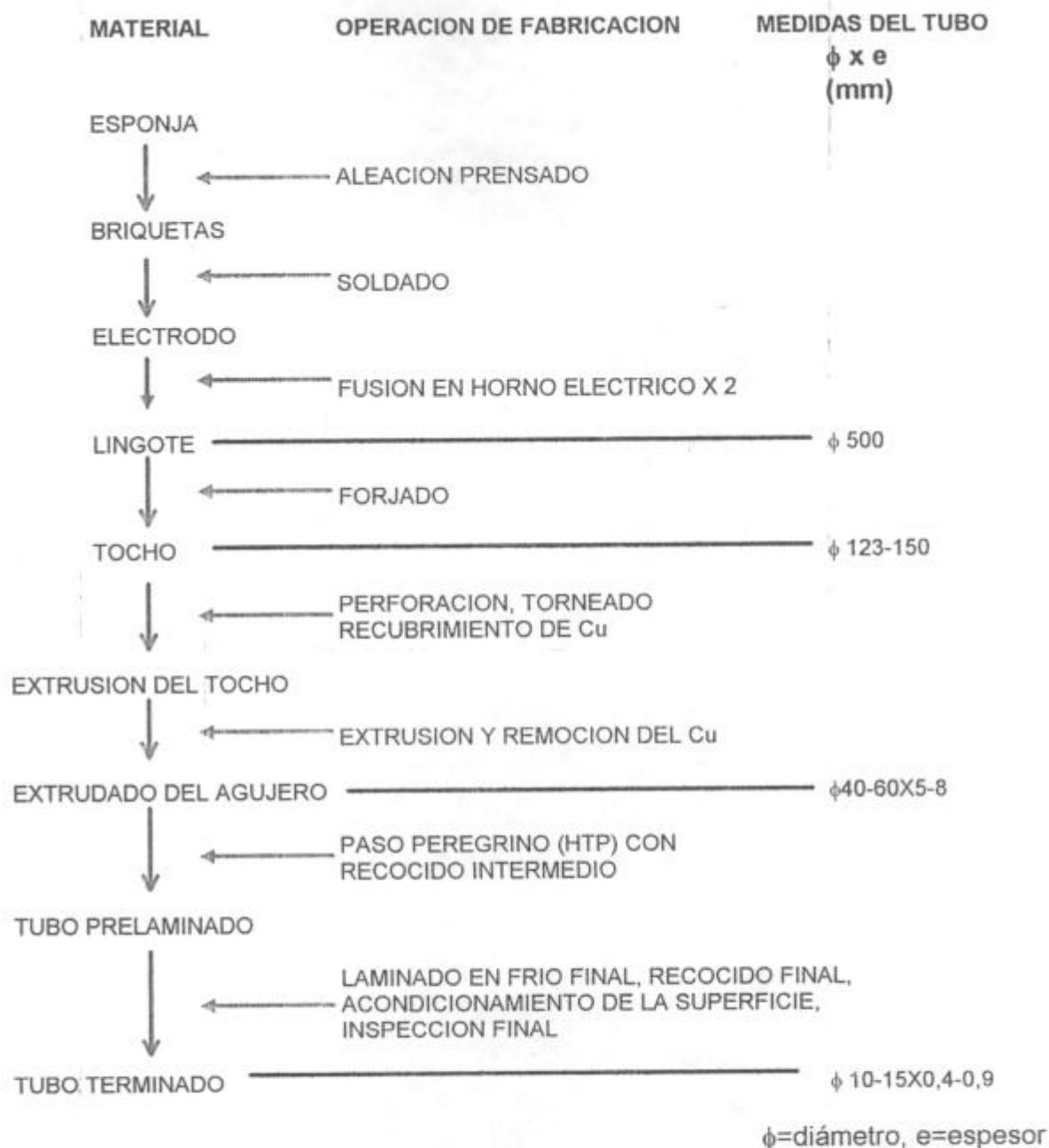


Fig. 13. Esquema de operaciones principales en la producción de vainas de Zry

Para ser apto el Zry ha de cumplir el análisis especificado en el lingote, para lo cual se debe partir de una esponja con muy bajos contenidos de impurezas, especialmente de aquellas de alta sección de capturas de neutrones térmicos (Hf, Co, Cd, Gd). Es también importante la uniformidad del análisis dentro de la esponja. Los elementos aleantes, de los cuales el O₂ es uno importante, se adicionan a la esponja. Las briquetas prensadas son soldadas por "electrón beam" (haz de electrones), para formar un electrodo el cual es fundido en un horno de arco eléctrico de alto vacío (alrededor de 10⁻³ mm de Hg). Esta operación se realiza dos veces para asegurar la uniformidad y homogeneidad en el lingote final.

El Zr tiene una estructura hexagonal a temperatura ambiente. En el Zr puro esta fase α es estable hasta 862°C donde se transforma en cúbica de cara centrada β . En las aleaciones comerciales esta transformación tiene lugar en un rango de temperatura superior donde el material contiene $\alpha + \beta$.

El forjado del Zry se hace en la región $\alpha + \beta$ o en la β . El equipo puede ser totalmente convencional. No obstante, se tiene que estar seguro que las condiciones de calentamiento sean tales que no se produzca una difusión nociva de gases dentro del material. La atmósfera debe ser ligeramente oxidante. Durante el enfriamiento del templado β se precipitará una fase secundaria rica en elementos de aleación (Cr, Fe). Si la precipitación no está uniformemente distribuida en el material tendrá una influencia negativa sobre las propiedades corrosivas. Por eso el templado β , es decir el calentamiento hasta la región β y el templado.

Los tochos de extrusión están preparados con una perforación y torneados. Están normalmente cubiertos de Cu para la protección contra la contaminación de la superficie durante el calentamiento y también para facilitar la lubricación durante la extrusión. El Cu se remueve después de la extrusión mediante un decapado en ácido nítrico. La extrusión se hace en la región α , es decir a una temperatura menor a 825°C.

El laminado en frío de los tubos se realiza por laminado de "paso peregrino". El paso peregrino puede realizarse con reducciones de área de hasta un 80%. La temperatura de recocido final puede variar entre 475 y 575 °C.

El acondicionamiento de la superficie de los tubos terminados se hace interiormente a través de un arenado y exteriormente de un pulido con banda abrasiva [10].

1.6.4- PROPIEDADES MECANICAS

Las propiedades mecánicas de las vainas dependen principalmente de las siguientes variables:

- Textura
- Reducción de área en el laminado final
- Temperatura de recocido final

Los tubos trabajados en frío por "paso peregrino" dan al material una textura donde el eje C de los cristales, es decir los polos basales, están orientados en una dirección perpendicular al eje longitudinal del tubo. La dirección de los polos basales dentro de este plano puede ser afectada por un cambio en el llamado valor Q. Este valor está definido como la relación entre la reducción en el espesor de pared y la reducción en el diámetro.

Un valor Q elevado, es decir una reducción grande de la pared y una pequeña reducción del diámetro, conducirá a una textura donde los polos basales están generalmente orientados en la dirección radial; mientras que un valor Q bajo, conducirá a cristales tangencialmente orientados. Dado que la dirección C es la "dirección dura" en el cristal, el laminado con un valor Q alto produce un tubo de

elevada dureza en la dirección radial, un laminado con bajo valor Q produce una dureza alta en la dirección tangencial.

Cuando se decide el valor Q, hay que tener en cuenta la orientación de hidruros. El hidrógeno es absorbido por el tubo en servicio y se precipita durante el enfriamiento en forma de plaquetas de hidruros. Estos hidruros se precipitan en la dirección principal de trabajo en la última operación de trabajado en frío. Entonces el trabajado en frío con un valor Q muy alto da hidruros tangenciales, mientras que con un valor Q bajo da hidruros radiales. Como los hidruros reducen la ductilidad y pueden iniciar fisuras, los usuarios de tubos normalmente especifican una orientación de hidruros que no se aparte mucho de la tangencial.

Otros factores que influyen en las propiedades mecánicas de los tubos terminados serían la reducción del área y la temperatura final de recocido. En la fig 14 se aprecia esto.

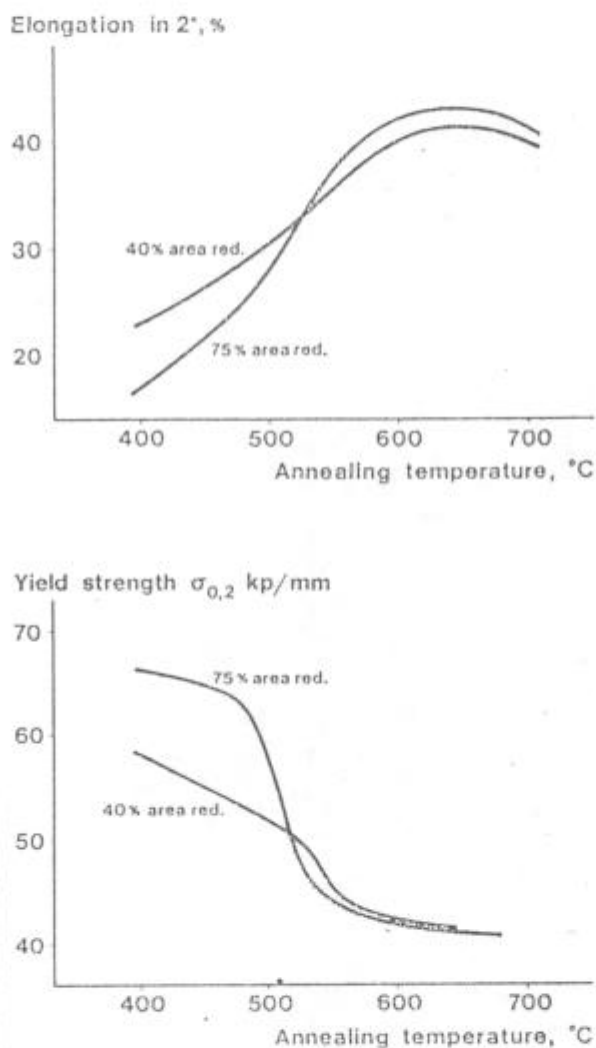


Fig. 14. Propiedades mecánicas del Zry en función de la temperatura de recocido y de la reducción de área

Las figuras ilustran que margen de resistencia y elongación son afectados por esos factores. Para elevadas reducciones de área las propiedades mecánicas cambian rápidamente con una temperatura de recocido de alrededor de 500°C. En algunos casos las propiedades mecánicas requeridas necesitan un recocido dentro de ese rango de temperatura, brindando un material parcialmente recrystalizado. En tales casos, la temperatura de recocido exacta debe ser determinada individualmente para cada lote de tubos [10].

1.6.5- PRECIPITADOS

Diferentes compuestos precipitan durante los tratamientos térmicos a que se somete el material en la fabricación de las vainas o durante la operación del reactor. En la tabla IV se da la composición química [8].

TABLA IV
PRECIPITADOS DEL ZIRCALLOY

TIPO DE PRECIPITADO	COMPOSICION	TEMPERATURA DE FORMACION
ZrCr ₂ (hexagonal)	Zr, Cr, Fe	740-790
ZrCr ₂	Zr ₃₃ (Cr+Fe) ₆₆ 0,1 < Cr/Fe < 1,3	835
ZrCr ₂ Zr ₃ Fe	Zr(CrFe) ₂ Zr ₇₅ Fe ₂₅	
ZrCr ₂ (hexagonal) ZrCr ₂ (cúbica) Zr ₃ Fe	Zr(CrFe) ₂ Zr ₇₅ Fe ₂₅	845

2- EQUIPO EXPERIMENTAL

2.1- EQUIPO DE PRESURIZACION

Para producir EA debemos someter al material a una sollicitación. En el uso normal de las vainas éstas se ven sometidas a presión, por lo que se decidió que un ensayo de presión era el que mejor reproducía las condiciones de operación. El ensayo entonces, consiste en presurizar la vaina hasta la explosión mientras se van captando las señales de EA mediante el uso de sensores.

Para la presurización se utiliza un equipo hidráulico controlado electrónicamente. Los componentes principales del equipo son:

- i) Cilindro multiplicador de presión
- II) Bomba hidráulica
- iii) Válvula proporcional de control de flujo y una válvula direccional
- iv) Acople vaina - cilindro
- v) Caja de protección
- vi) Comando electrónico del equipo
- vii) Circuito del sensor de presión

La bomba hidráulica es accionada por un motor eléctrico y permite alcanzar una presión máxima de 120atm. Para explotar las vainas se necesita una presión cercana a las 700 atm, por lo que se utiliza un cilindro multiplicador de presión, con una relación entre presión de salida y de entrada de 9:1. La multiplicación de presión se logra por la relación de áreas existente entre las dos caras del mismo. Se utilizan dos válvulas para controlar el sentido de circulación del fluido y su presión. Estas válvulas se controlan eléctricamente. La válvula direccional permite elegir el sentido de movimiento del pistón, mientras que la válvula proporcional controla la presión en el interior de la vaina. Como fluido se utiliza aceite (tellus 46). El comando electrónico permite encender el motor eléctrico, y controlar las dos válvulas.

Es de vital importancia el acople de la vaina al equipo para que no haya pérdida de fluido. Se utiliza un sistema de tornillo y tuerca que mediante un ángulo aprisiona la vaina que ha sido previamente abocardada.

Se utiliza un sensor para determinar la presión en la vaina. La presión se utiliza como parámetro externo en el equipo que capta los eventos de EA.

Finalmente y como medida de seguridad, el área donde está la vaina a ensayar se cubre con una caja de acrílico para impedir que en el caso en que se desprenda alguna parte del acople durante la explosión se esparza el aceite.

A continuación se presenta un esquema general del equipo hidráulico:

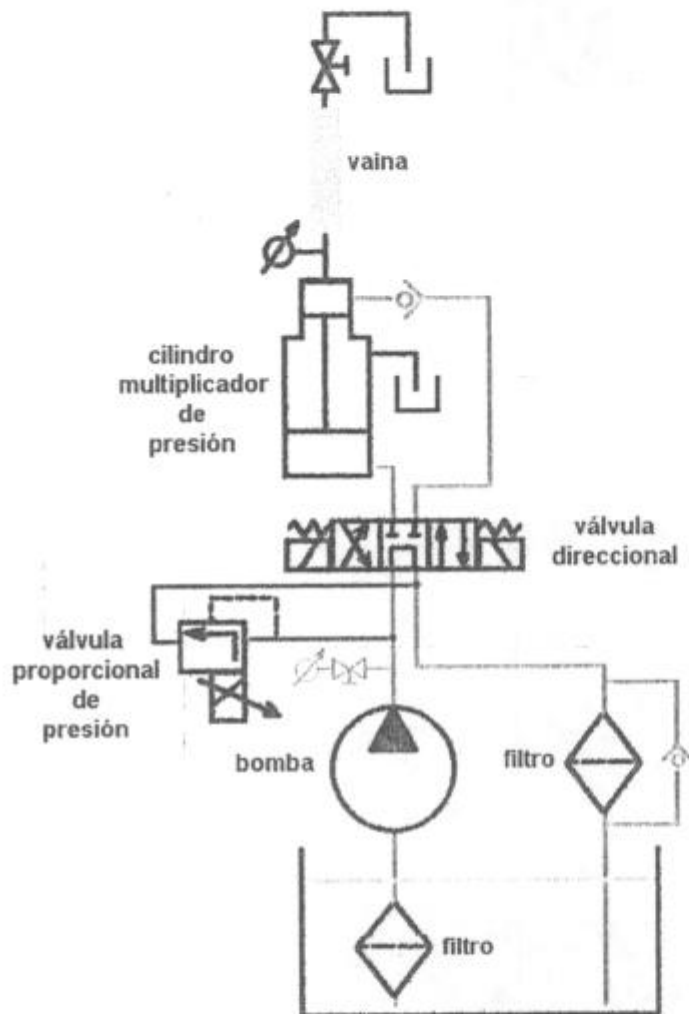


Fig.15. Esquema hidráulico del equipo

2.1.1- CILINDRO MULTIPLICADOR DE PRESION

El cilindro multiplicador de presión tiene como objeto elevar en una relación de 9 a 1 la presión suministrada por la bomba hidráulica. Consta de dos cámaras: la de alta presión y la de baja presión, y de dos pistones coaxiales solidarios: el de alta y el de baja presión. Debido a la diferencia en el área de los pistones, una presión en la cámara de baja se transformará en una presión nueve veces mayor en la cámara de alta. En la cámara de baja hay una entrada para el fluido, mientras que

en la cámara de alta hay una entrada para el fluido y una salida para el acople vaina-cilindro; también hay un drenaje. La entrada de la cámara de alta se acopla a la bomba hidráulica a través de una válvula de retención, que impide que durante el ensayo el fluido retorne al depósito de aceite.

Las dimensiones son:

$$\Phi_{\text{pistón alta}} = 30\text{mm}$$

$$\text{Area pistón}_{\text{alta}} = 2827.43 \text{ mm}^2$$

$$\Phi_{\text{pistón baja}} = 88,9 \text{ mm}$$

$$\text{Area pistón}_{\text{baja}} = 24828,66 \text{ mm}^2$$

La relación de presiones será entonces:

$$F = p * A \Rightarrow F_{\text{alta}} = F_{\text{baja}} \Rightarrow p_{\text{alta}} * \text{Area}_{\text{alta}} = p_{\text{baja}} * \text{Area}_{\text{baja}} \Rightarrow$$

$$p_{\text{alta}}/p_{\text{baja}} = \text{Area}_{\text{baja}}/\text{Area}_{\text{alta}}$$

En el Apéndice se presenta un plano del cilindro multiplicador de presión.

2.1.2- BOMBA HIDRAULICA

La bomba hidráulica es una Unidad Oleohidráulica JOA Vickers, consta de las siguientes partes:

- Motor trifásico Michalovce 3 ATE80-4 de 0,75Kw
- Depósito de aceite T-10
- Filtro de succión OF3-08-10
- Bomba a engranaje LDPO 507
- Nivel de aceite y temperatura VCFLT221
- Boca de carga UC-AB81001
- leva UCDC2855
- Engranaje UCDC28PBPB

La presión máxima que permite alcanzar el equipo es de 150bar, con un caudal de 1,5lt/min. Además la unidad tiene un "manifold" para ubicar las válvulas, y un filtro de retorno OFRS-25-F-10.

2.1.3- VALVULAS

Las válvulas son una parte fundamental del equipo. Se utilizan dos válvulas, una proporcional que permite controlar la presión y otra direccional, que permite controlar a qué cámara del cilindro multiplicador se envía el aceite, con lo que se controla el movimiento del mismo.

La válvula direccional tiene tres posiciones, una central y dos laterales denominadas A y B. En la posición central el fluido proveniente de la bomba se hace retornar al depósito de aceite, en la posición B el fluido se envía a la cámara de alta del cilindro multiplicador y en la posición A el fluido se envía a la cámara de baja. Los solenoides que controlan la posición de la válvula son accionados mediante una tensión eléctrica continua de 24volts.

La válvula proporcional también es activada por un solenoide. Variando la tensión eléctrica aplicada al solenoide, entre 0 y 24volts es posible controlar el caudal que pasa a través de la misma, con lo que se controla la presión en la vaina. Durante el ensayo se varía la tensión aplicada al solenoide, de tal manera que se va aumentando la presión que soporta la vaina de acuerdo a una función predeterminada.

Los modelos de válvulas son los siguientes:

- Válvula direccional Vickers DG4V3-8C-MUH-7-60
- Válvula proporcional Vickers ECG-02-10-32

2.1.4- ACOPLE VAINA-CILINDRO

El acople vaina-cilindro es otra parte fundamental del equipo. La vaina es un cilindro hueco abierto en ambos extremos, por lo que se debe tapar uno de sus extremos y permitir el paso del fluido por el otro sin que haya ninguna pérdida. Además se debe contemplar la purga de la vaina, es decir todo el volumen de la vaina se debe llenar de aceite, por lo que el aire presente inicialmente debe ser desalojado. Una vez hecho esto, se debe proveer un cierre adecuado para evitar pérdidas.

Cuando se inició el presente trabajo no se disponía del acople vaina-cilindro, por lo que se diseñó uno, teniendo en cuenta las sugerencias de CONUAR, y se construyó en el taller del ENDE.

En lo que sigue, los números entre paréntesis indican el número de pieza al que se hace referencia (ver fig 16).

Para adaptar la vaina al cilindro se utiliza un acople basado en un sistema de tornillo (4 y 6) y tuerca (5). Inicialmente se abocarda la vaina en ambos extremos mediante una herramienta construida para tal fin (ver Apéndice) con un ángulo de 60° y luego sobre cada extremo se enrosca una tuerca que tiene un chanfle de igual ángulo sobre un tornillo con un chanfle idéntico. Al ir enroscando la tuerca sobre el tornillo, el extremo abocardado de la vaina queda aprisionado entre los dos chanfles, produciendo así un ajuste muy bueno, capaz de soportar la presión necesaria para romper la vaina.

El ajuste superior tiene un sistema de purga: un tornillo (7) con una punta a 60° se cierra sobre el la parte central del ajuste permitiendo, cuando está desenroscado, que el aire escape por un orificio lateral. Cuando ya no queda aceite se enrosca firmemente este tornillo hasta que la punta presione firmemente sobre una base con idéntico ángulo.

Además hay una interfase múltiple con el cilindro que es un paralelepípedo con cuatro salidas (2). Todas las salidas tienen bases con ángulos a 60°, una se utiliza para conectar al cilindro (1), otra para conectar la vaina (4), otra para conectar un manómetro analógico (8) y otra para ubicar un sensor de presión (3).

El principal medio de evitar pérdidas es proveer un ajuste cónico; donde esto no ha sido posible, se utilizaron tuercas de cobre (ver Apéndice).

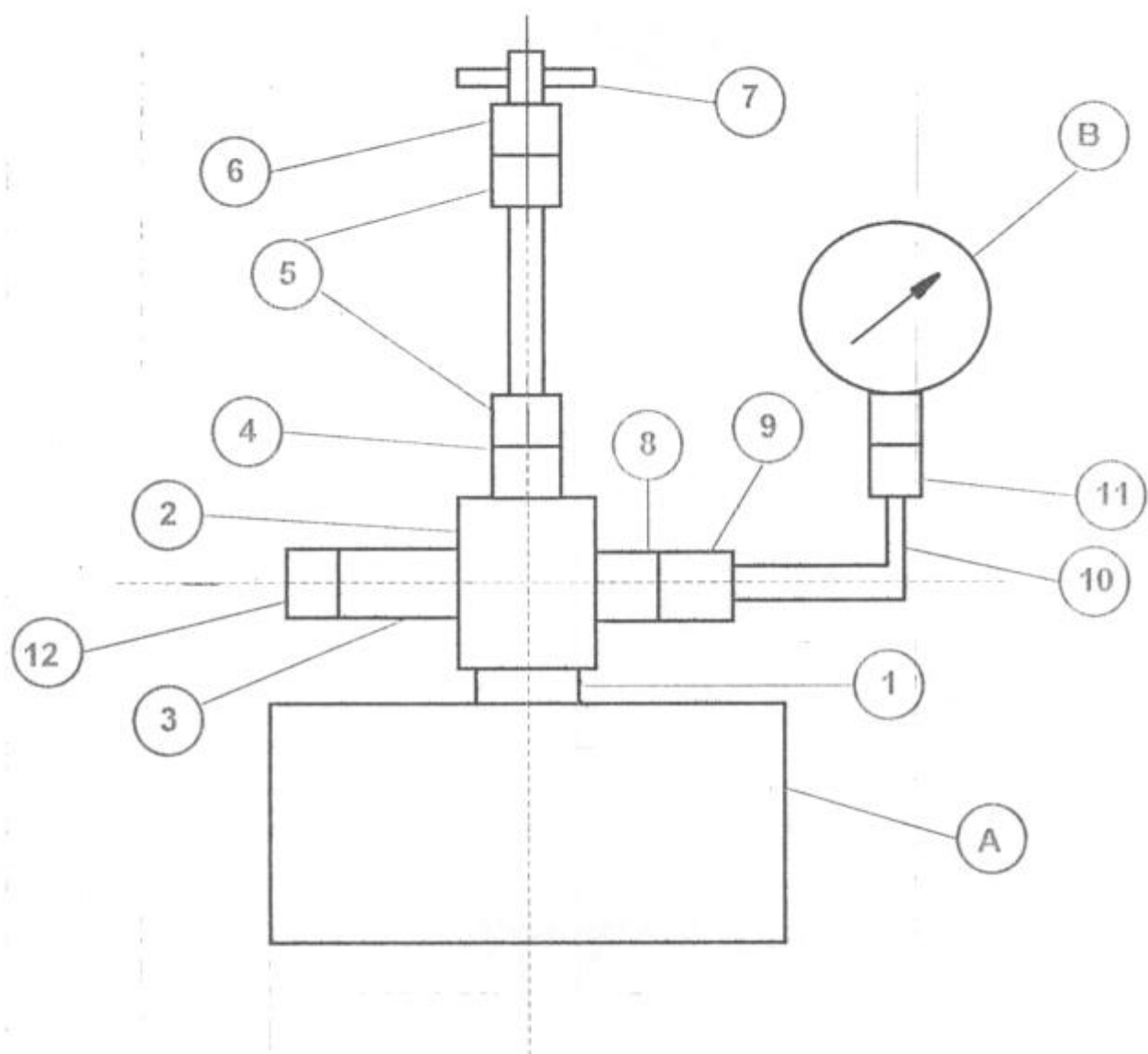
Se conectó un manómetro de agujas para medir la presión en el interior de la vaina. Para evitar el golpe de presión que se produce cuando la misma explota se diseñó y construyó el conjunto (9). Se enroscó interiormente un cilindro y se ubicó un eje roscado con poco juego en su interior de tal manera que el aceite pueda circular entre los filetes de la rosca pero haciendo que cualquier variación brusca de presión no sea transmitida de manera inmediata al manómetro.

En el Apéndice se presentan planos detallados de cada pieza.

2.1.5- CAJA DE PROTECCION

Se diseñó y construyó una caja de protección de acrílico con perfiles de aluminio, a fin de evitar que el aceite se derrame después de la explosión o que un eventual desprendimiento de alguna parte afecte el ambiente.

En el Apéndice se muestran los planos de la caja.



1 a 12 : acoples

A : Cilindro multiplicador

B : Manómetro

Fig. 16. Acople Vaina - Cilindro

2.1.6- COMANDO ELECTRONICO DEL EQUIPO

El comando electrónico del equipo cumple las siguientes funciones:

- i) Encendido del motor que acciona la bomba hidráulica
- ii) Control del sentido de circulación del fluido a través del comando de la válvula direccional
- iii) Control de la presión del fluido a través del comando de la válvula proporcional

Para realizar este comando se mejoró un equipo ya existente en el laboratorio.

A continuación se presenta un esquema general del circuito eléctrico del comando de válvulas.

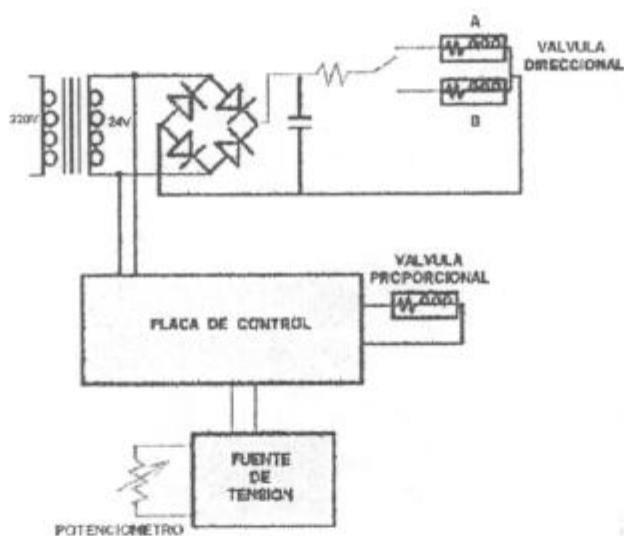


Fig. 17. Esquema eléctrico del comando de válvulas

- i) El encendido del motor eléctrico se realiza a través de una llave unipolar que comanda un contactor tripolar que acciona el motor. Además hay conectado en serie con el motor, un relé térmico de sobrecorriente con el fin de protegerlo.

Las partes componentes de esta sección son:

- Un motor trifásico
- Un contactor tripolar Siemens 3TB

- Un relé térmico de sobreintensidad Siemens 3UA

ii) El control de la válvula direccional se logra a través de una sencilla llave de tres puntos. En su posición central están abiertos los circuitos de ambos solenoides, en la posición superior se cierra el circuito del solenoide A y en la posición inferior se cierra el circuito del solenoide B (ver fig.17).

iii) El control de la válvula proporcional es un poco más complejo ya que involucra varios elementos. La posición de esta válvula se controla variando la tensión eléctrica que se proporciona al solenoide. Esto se realiza mediante una placa de control, la que a su vez es controlada por una fuente de tensión variable que se acciona a través de un potenciómetro que se controla manualmente. La forma en que varía en el tiempo el valor de resistencia eléctrica de este potenciómetro, determina la rampa temporal que sigue la presión en el interior de la vaina.

Inicialmente se experimentó con distintas rampas de presión, el objetivo era lograr que hubiese la mayor cantidad posible de eventos de EA, también se filmaron algunos ensayos para ver la dinámica de la rotura y se buscó que esta dinámica se pudiese observar bien en las filmaciones. A través de un proceso de prueba y error finalmente se determinó que lo más conveniente era aumentar la resistencia del potenciómetro que controla la salida de la fuente de tensión eléctrica a un ritmo de 10 divisiones del potenciómetro cada 4 segundos hasta que la presión llegase a 650 atm, luego se avanza a un ritmo de 1/2 división cada 4 segundos hasta la rotura de la vaina.

El circuito de la fuente de tensión variable que se diseñó para controlar la válvula proporcional se presenta en el Apéndice.

2.1.7- CIRCUITO DEL SENSOR DE PRESION

El acople cilindro-vaina prevé una entrada para un sensor de presión, de tal manera de poder sensar eléctricamente la presión en el interior de la vaina, tal como lo hace el manómetro de agujas. La señal eléctrica entregada por este sensor, se puede utilizar como parámetro externo para el equipo de EA. No se contó con un sensor que cubriese el rango de 0 a 700 atm, sino que se disponía de uno que cubría el rango de 0 a 200 atm, por lo que se decidió ubicarlo de tal forma que sensara la presión en la cámara de baja presión del cilindro multiplicador. Idealmente al multiplicar por nueve este valor se obtiene el valor de presión en la cámara de alta presión y por consiguiente en el interior de la vaina. En la práctica se observó que se lograba una muy buena aproximación.

Al ubicar de esta forma el sensor y comenzar a medir se observó que la señal eléctrica entregada por el sensor era demasiado pequeña como para ser correctamente tomada por el equipo de análisis (AEDOS), por lo que se decidió diseñar y construir un simple amplificador electrónico de tensión para elevar esta señal.

A continuación se presenta un esquema del circuito del sensor y en el Apéndice se presenta el circuito del amplificador.

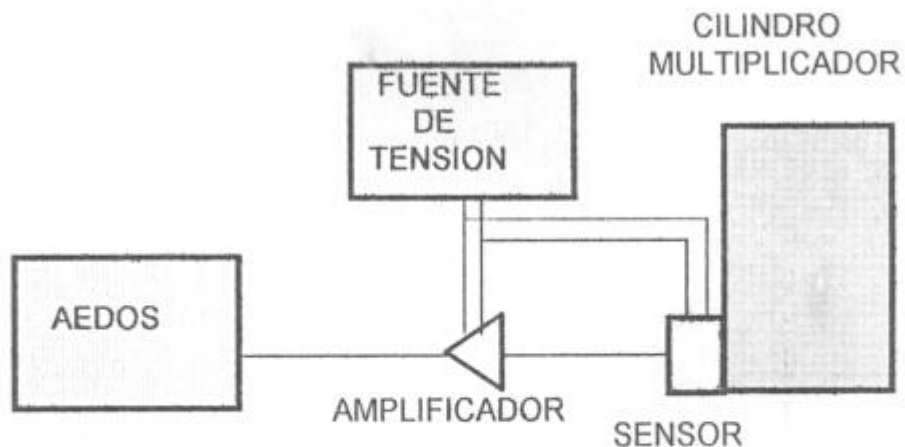


Fig 18. Circuito del sensor de presión

2.2 EQUIPO DE EMISION ACUSTICA

Se utiliza para el estudio de la EA el equipo Acoustic Emission Data Overseeing System (A.E.D.O.S.) de la compañía CISE. Este equipo fue diseñado principalmente para el análisis cuantitativo de emisiones de tipo discretas. A partir de la traducción del evento por un sensor, el sistema A.E.D.O.S. tiene todo lo necesario para la caracterización general de la EA. El equipo entrega información tal como:

- Amplitud del evento
- Duración
- "Rise Time"
- Energía
- Eventos en función del tiempo
- Eventos en función de un parámetro externo

2.2.1- DESCRIPCION FUNCIONAL

La arquitectura del sistema está organizada en base a cuatro secciones:

- i) Sección de traducción

- ii) Sección de tratamiento individual de la señal del transductor
 - iii) Sección de gestión centralizada de cada evento de EA. Las secciones ii) y iii) constituyen la parte del equipo denominada "Front End"
 - iv) Sección elaboradora de los datos adquiridos, después del tratamiento individual en el "Front End"
- A continuación presentamos un diagrama en bloques del equipo AEDOS (fig. 19).

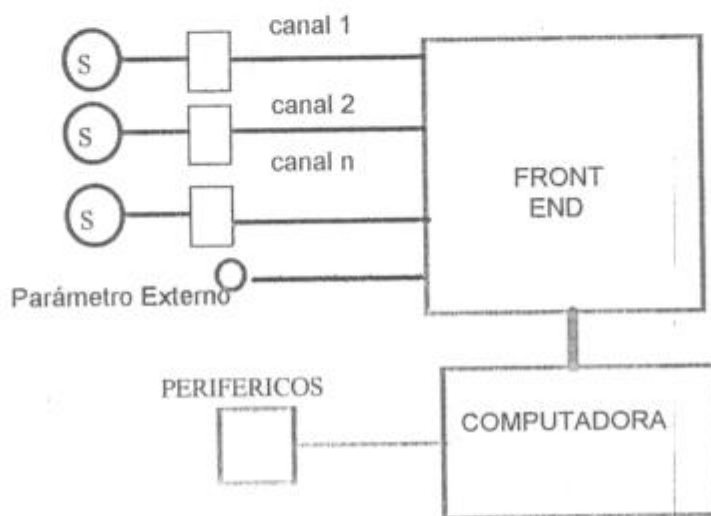


Fig. 19. Diagrama en bloques del equipo de EA

2.2.1.1- SECCION DE TRADUCCION

La sección de traducción de la señal está constituida por un número de sensores igual al número de canales necesarios para la captación de la señal de interés del ensayo a realizar. Los sensores son en general cristales piezoeléctricos. Asociado a cada sensor y colocado lo más cerca de él hay un preamplificador, que se encarga de elevar el nivel de la misma. La alimentación del preamplificador es generada por el front end.

2.2.1.2- SECCION DE TRATAMIENTO INDIVIDUAL DE LA SEÑAL DEL TRANSDUCTOR

La señal preamplificada proveniente de la fuente de EA se envía a un amplificador con umbral programable, que forma parte de la sección de tratamiento individual. 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 esta señal cumple con todas las condiciones impuestas para asegurar que corresponda a un evento válido de EA.

2.2.1.3- SECCION DE GESTION CENTRALIZADA DE CADA EVENTO DE EA

La función centralizadora del tratamiento de la señal que forma parte del front end se ocupa esencialmente de la coordinación del canal bajo medición, además de la comunicación entre el front end y el procesador.

2.2.1.4- SECCION ELABORADORA DE DATOS

El procesador central tiene funciones diversas, desde la interfaz con el operador para que este elija el criterio de evaluación de las señales adquiridas, hasta la elaboración de los datos adquiridos.

Partiendo de los datos recibidos, el procesador procede a registrar en el disco duro los valores característicos que describen el evento. Con los datos así almacenados es posible la presentación de los mismos en forma de histogramas, gráficos, y tablas.

2.3- SENSORES DE EMISION ACUSTICA

Inicialmente se utilizaron sensores PINDUCER VP-1093 de banda ancha de la compañía Valpey-Fisher, cuyas hojas de datos se encuentran en el Apéndice.

Para ubicar los sensores sobre la vaina se diseñó y construyó dos portasensores en aluminio. Los planos de los mismos se encuentran en el Apéndice. Estos portasensores se sujetaban a la vaina a través de bandas elásticas de goma. Esto tenía la ventaja de proporcionar una buena sujeción a la vez que permitía que la vaina se deformase libremente.

Se utilizaron dos sensores, cada uno cerca de los extremos de la vaina. Para que un evento fuese considerado válido, debía ser captado por ambos sensores.

Pero estos sensores demostraron no ser muy buenos para estos ensayos. Por un lado su sensibilidad era muy pobre, ya que son de pequeño diámetro (2,6 mm), lo que condujo a ensayos en los que se registraban muy pocos eventos de EA, y por otro lado la capa de oro que recubría el cristal piezoeléctrico se desgastaba muy rápidamente con el uso. Si bien luego se depositó una nueva capa de metal sobre la superficie del sensor, esto no dio buen resultado.

Las limitaciones ya indicadas de los Pinducers determinaron que se reemplazaran los mismos por sensores PAC WD-943, también de banda ancha, los que demostraron ser mucho mejores. Su mayor área de contacto (diámetro 17,5mm) hacía que fuesen mucho más sensibles, pero esto a su vez impedía que fuesen colocados directamente sobre la vaina. Por lo tanto se diseñó un nuevo portasensor que era puesto en contacto con la vaina, pero el resultado no fue alentador, por esto se decidió utilizar un solo sensor y ubicarlo sobre la tuerca superior de cierre de la vaina. La mayor sensibilidad de estos sensores se tradujo en un número mucho mayor de eventos de EA registrados. Los datos del sensor están en el Apéndice.

3- RESULTADOS EXPERIMENTALES

3.1- DESCRIPCION DE LOS ENSAYOS

Con el fin de estudiar la EA en vainas combustibles de zircaloy-4 tipo CANDU, se tomaron segmentos de las mismas, sin defectos y con distintos defectos típicos de fabricación, y se las sometió a ensayos de explosión a temperatura ambiente.

Las características de las probetas son las siguientes:

Material:	zircaloy-4
Longitud:	150mm
Diámetro exterior:	$13,08 \pm 0,04\text{mm}$
Espesor:	0,38mm (mínimo)

En una primera etapa se ubicaron sobre la vaina dos sensores PINDUCER, cada uno a una distancia de 15mm del borde de la vaina. Luego se utilizó un solo sensor PAC, ubicado sobre la tuerca de cerrado superior de la vaina.

Se experimentó con distintas rampas de presión, finalmente se utilizó una rampa de 105atm/min hasta llegar a una presión de 650atm, momento en el cual se cambia a una rampa de 14atm/min hasta que se produce la rotura de la probeta.

Los primeros 22 ensayos sirvieron para la puesta a punto del equipo y el ajuste de todas las variables intervinientes, por lo que sus resultados no son utilizados en las estadísticas y conclusiones que siguen.

Los 13 ensayos a partir del número 23 se realizaron bajo las mismas condiciones, por lo que son objeto del estudio que sigue.

En la fig 20 se presenta un diagrama en bloques de la disposición de los equipos para la realización del ensayo. Se acopla la vaina al equipo hidráulico, se coloca un sensor de EA sobre la misma y se conecta dicho sensor al equipo AEDOS a través de un preamplificador. Dicho equipo toma los distintos eventos de EA que se van produciendo y los analiza y registra. Por otro lado se utiliza un sensor de presión para medir la misma dentro de la vaina, esta señal se utiliza como parámetro externo para el AEDOS, de esta forma se pueden vincular temporalmente los eventos con la presión en el interior de la vaina. Como ya fue indicado, la señal proporcionada por este sensor de presión es demasiado pequeña como para ser tomada por el AEDOS, por lo que se utiliza un amplificador para elevar su nivel. Para su posterior análisis se digitalizaron por medio de un osciloscopio LeCroy 9360 los eventos correspondientes a cada ensayo. Esto se realiza a través de dos salidas de señal que proporciona el AEDOS. La salida "trigger" emite una señal de disparo para el osciloscopio cada vez que se presenta un evento y la salida "canal 1" proporciona la señal que ingresa al equipo por el canal 1, es decir proporciona el evento.

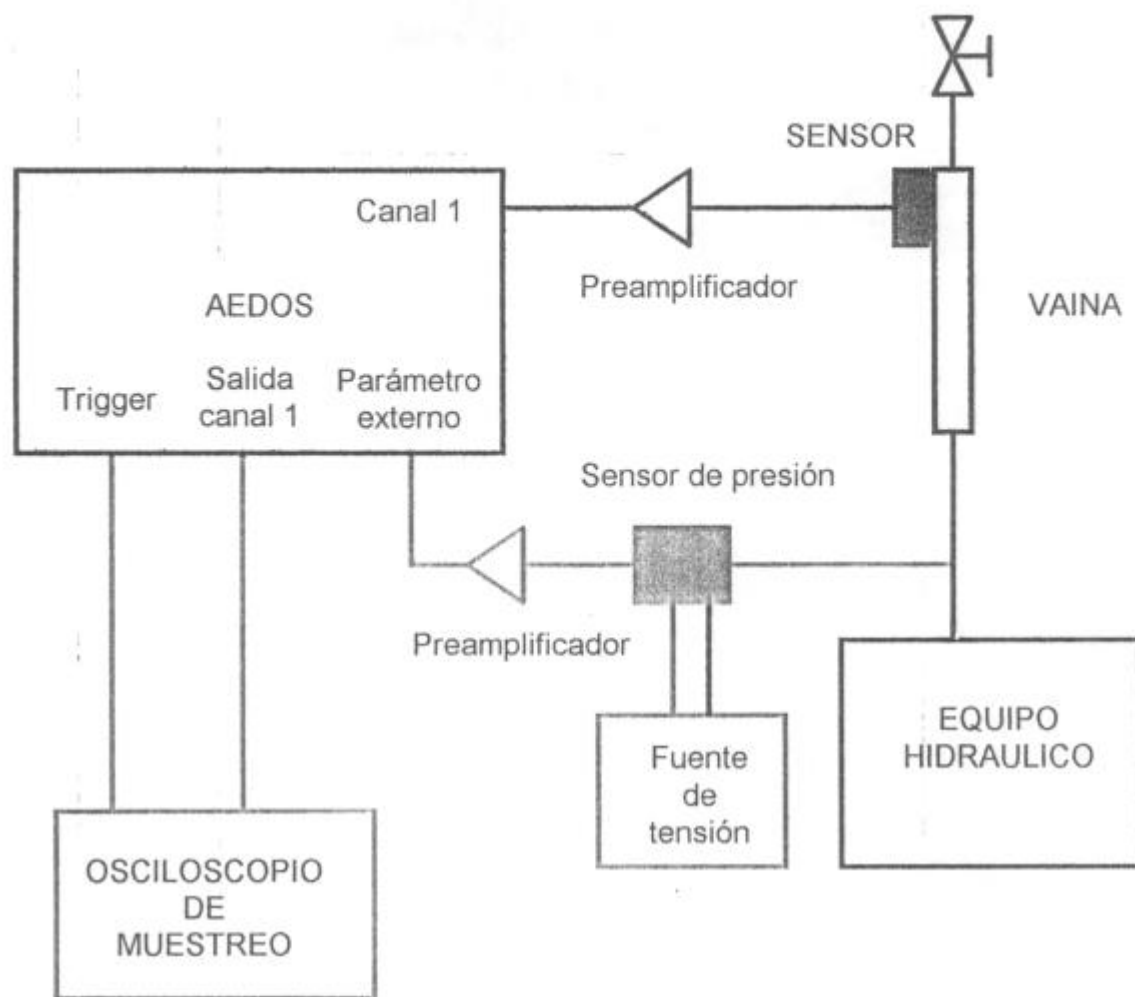


Fig. 20. Esquema del ensayo

A continuación presentamos en detalle el procedimiento de operación del equipo hidráulico. Estos son los pasos (ver fig. 21):

- 1- Ejecución del montaje de la muestra.
- 2- Encendido del equipo hidráulico desde el comando electrónico
- 3- Activación de la llave selectora de la válvula direccional en la posición "B", hasta que rebalse aceite por la válvula de purga y el posterior ajuste de la misma.
- 4- Activación de la llave selectora en "B" durante 60 seg., para que el pistón del cilindro multiplicador baje al punto muerto inferior.
- 5- Activación de la llave de la válvula direccional a la posición "A", generando presión hidráulica en el sistema.
- 6- Variación manual de la posición del potenciómetro a una velocidad de 10 divisiones cada cuatro segundos hasta que se llegue a las 700 divisiones, a partir de ese

momento hacerlo a una velocidad de media división cada 4 segundos hasta que se produzca la rotura de la vaina.

7- Una vez producida la rotura la válvula direccional se sitúa en centro cerrado y se envía el caudal a tanque.

8- Apagado del equipo.

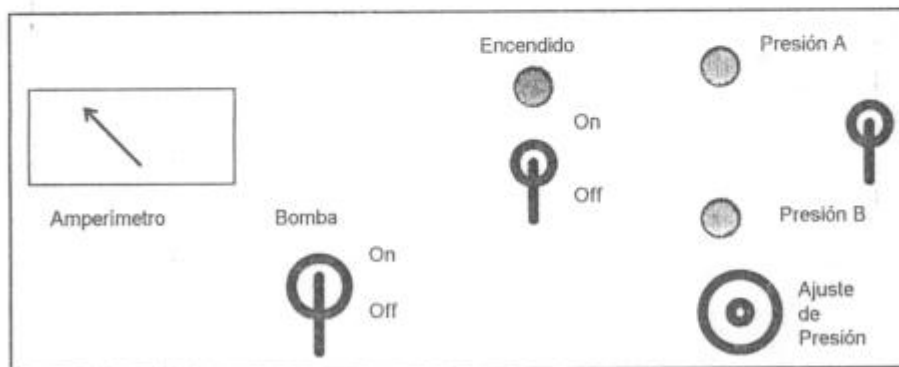


Fig. 21. Esquema del tablero de control.

3.2- CARACTERIZACIÓN DE LOS DEFECTOS EN LAS VAINAS

Hay distintos defectos típicos que se producen en las vainas como consecuencia de su proceso de fabricación. Es necesario aclarar que estos defectos son defectos macroscópicos, no nos referimos aquí a defectos tales como dislocaciones, intersticiales, etc. Los defectos en las vainas se detectan por ultrasonido y por inspección visual. CONUAR ha facilitado la terminología empleada para designar a los distintos defectos y también ha suministrado los registros de ultrasonido correspondientes. A continuación se nombran los distintos tipos de defectos externos más usuales:

- i) Uñazo
- ii) Desgarro
- iii) Raya longitudinal
- iv) Impronta
- v) Puntos negros alineados
- vi) Facetado
- vii) Ovalidad

Los registros de ultrasonido consisten en 8 curvas, las dos primeras se refieren a las señales suministradas por dos sensores ubicados de manera axial con el eje de la vaina, las tercera y cuarta curvas corresponden a otros dos sensores que están ubicados de manera transversal al eje de la vaina. Las dos curvas que siguen indican el espesor de las vainas. Por último las restantes dos curvas indican respectivamente su diámetro exterior y su diámetro interior. Cada una de las vainas fabricadas es examinada, si se encuentra algún defecto, la vaina es descartada.

Para el presente trabajo se ha estudiado metalográficamente cada uno de estos defectos por medio del microscopio electrónico de barrido (MEB). En lo que sigue se muestran fotos microscópicas de cada defecto así como su correspondiente registro de ultrasonido. Como ya fue señalado uno de los objetivos del presente trabajo es investigar si hay diferencias en la EA generadas en vainas con y sin defectos.

3.2.1- UÑAZO

Visualmente aparece como una raya circular sobre la superficie de la vaina. Probablemente sea causada por la cinta de pulido, ya que sobre toda la superficie de la vaina se observan marcas de esta cinta (ver sección 1.6.3).

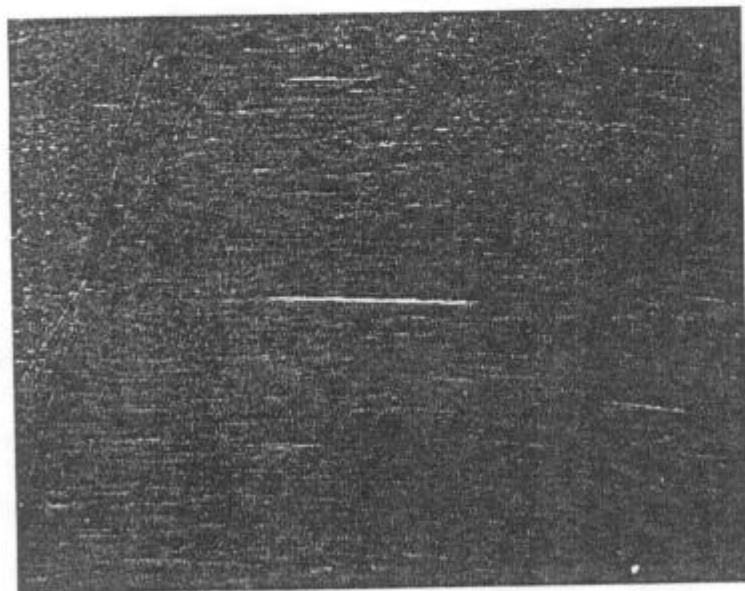


Fig. 22. Foto de un uñazo con un aumento de 50 x

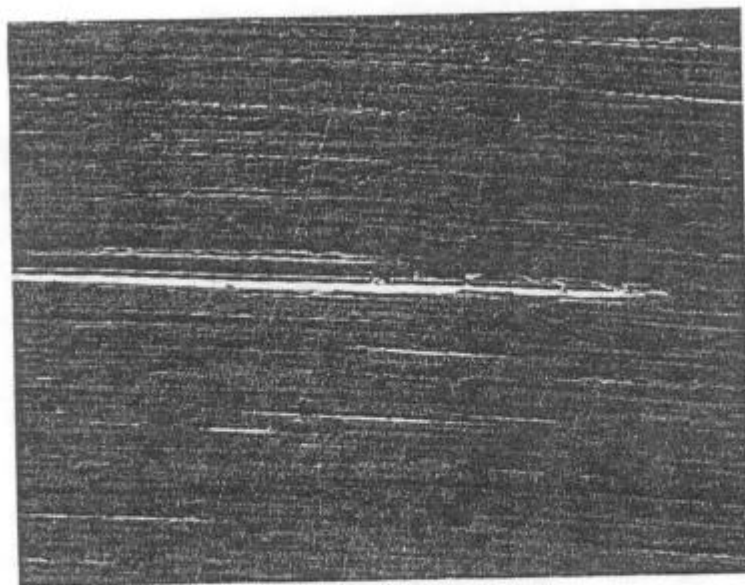


Fig. 23. Foto de un uñazo con un aumento de 200 x

3.2.2- DESGARRO

Visualmente aparece como una zona de distinto color sobre la superficie de la vaina. Al incrementar el aumento del MEB no se observa que esta zona tenga alguna característica que la diferencie del resto, donde no hay ningún defecto.

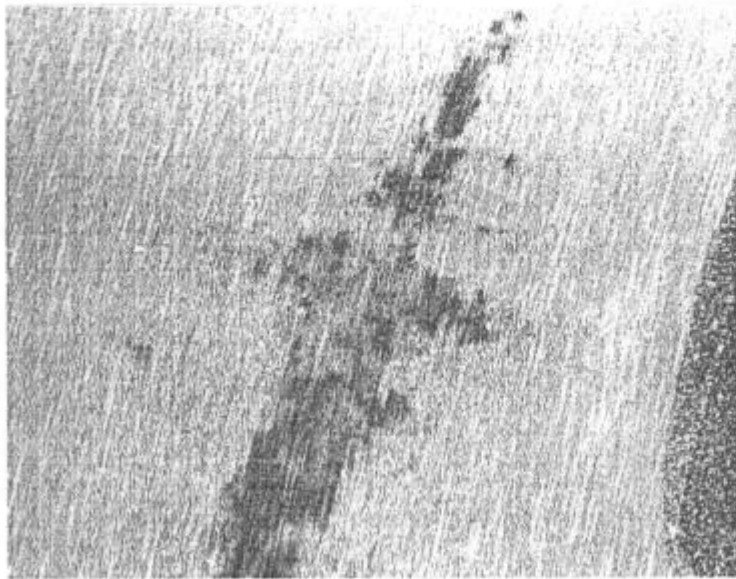


Fig. 25. Foto de un desgarro con un aumento de 50 x

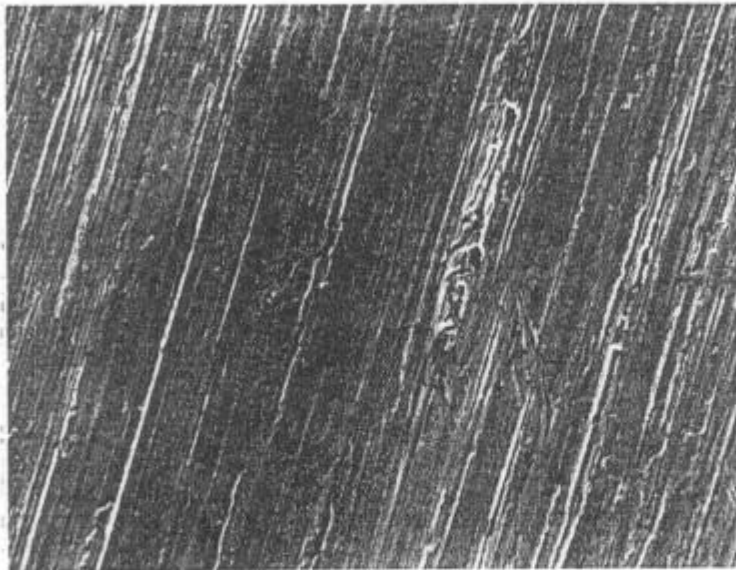


Fig. 26. Foto de un desgarro con un aumento de 400 x

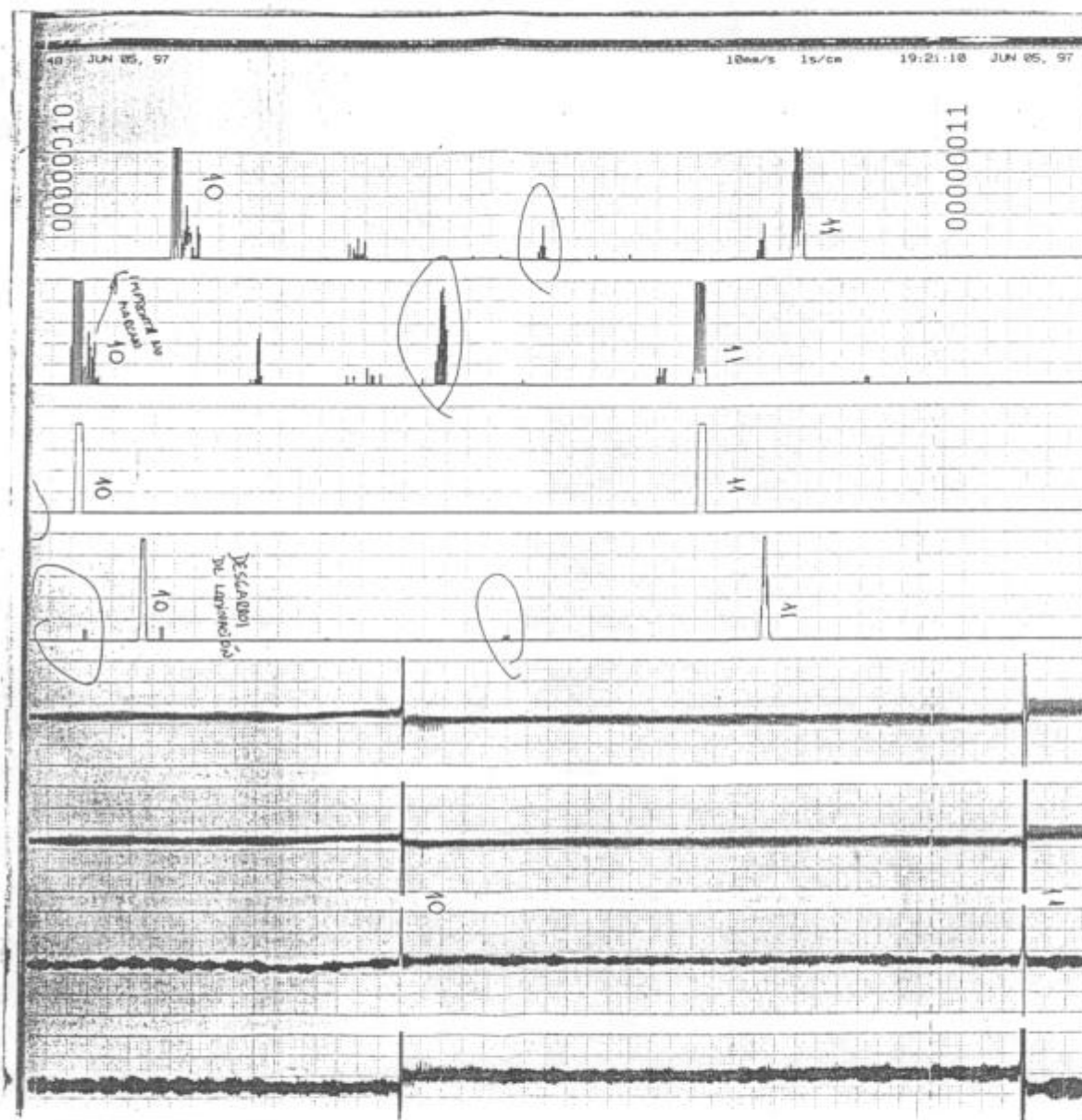


Fig. 27. Registro de ultrasonido correspondiente a un desgarró

3.2.3- RAYA LONGITUDINAL

Visualmente aparece como una raya axial sobre la superficie de la vaina. Su diferencia con un uñazo es su mayor longitud y su dirección. Posiblemente sea causada por el manipuleo de las vainas.

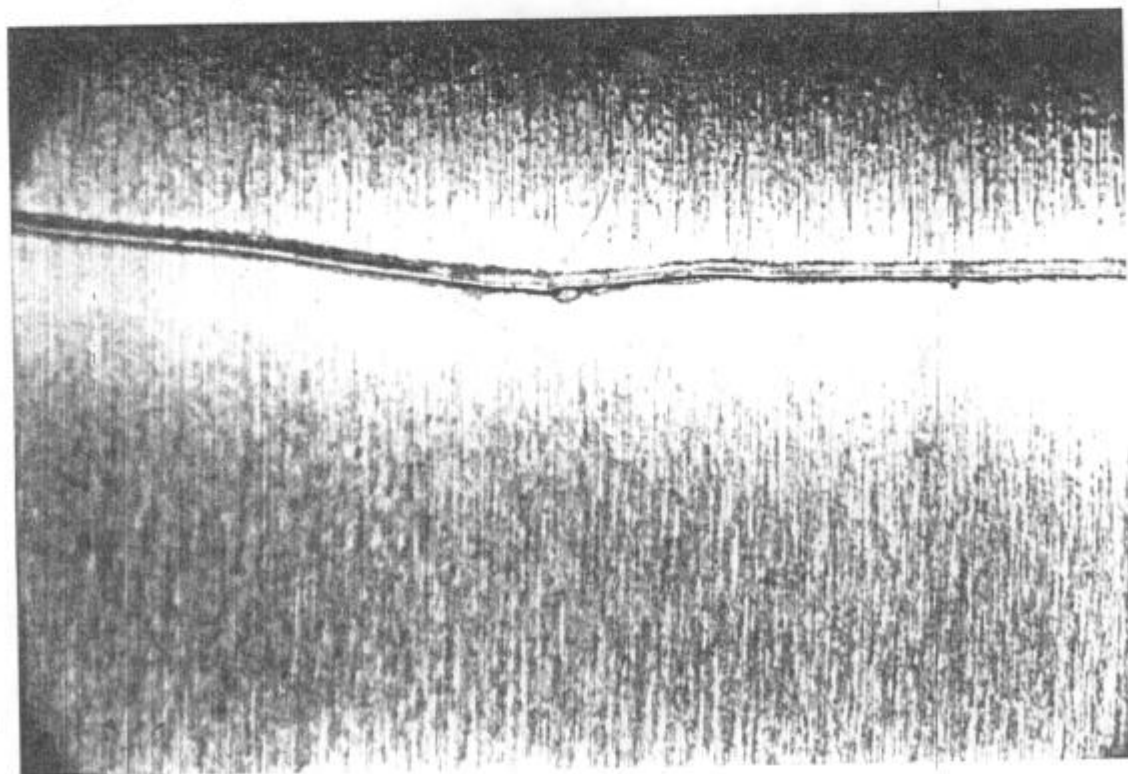


Fig. 28. Foto de una raya longitudinal con un aumento de 25 x

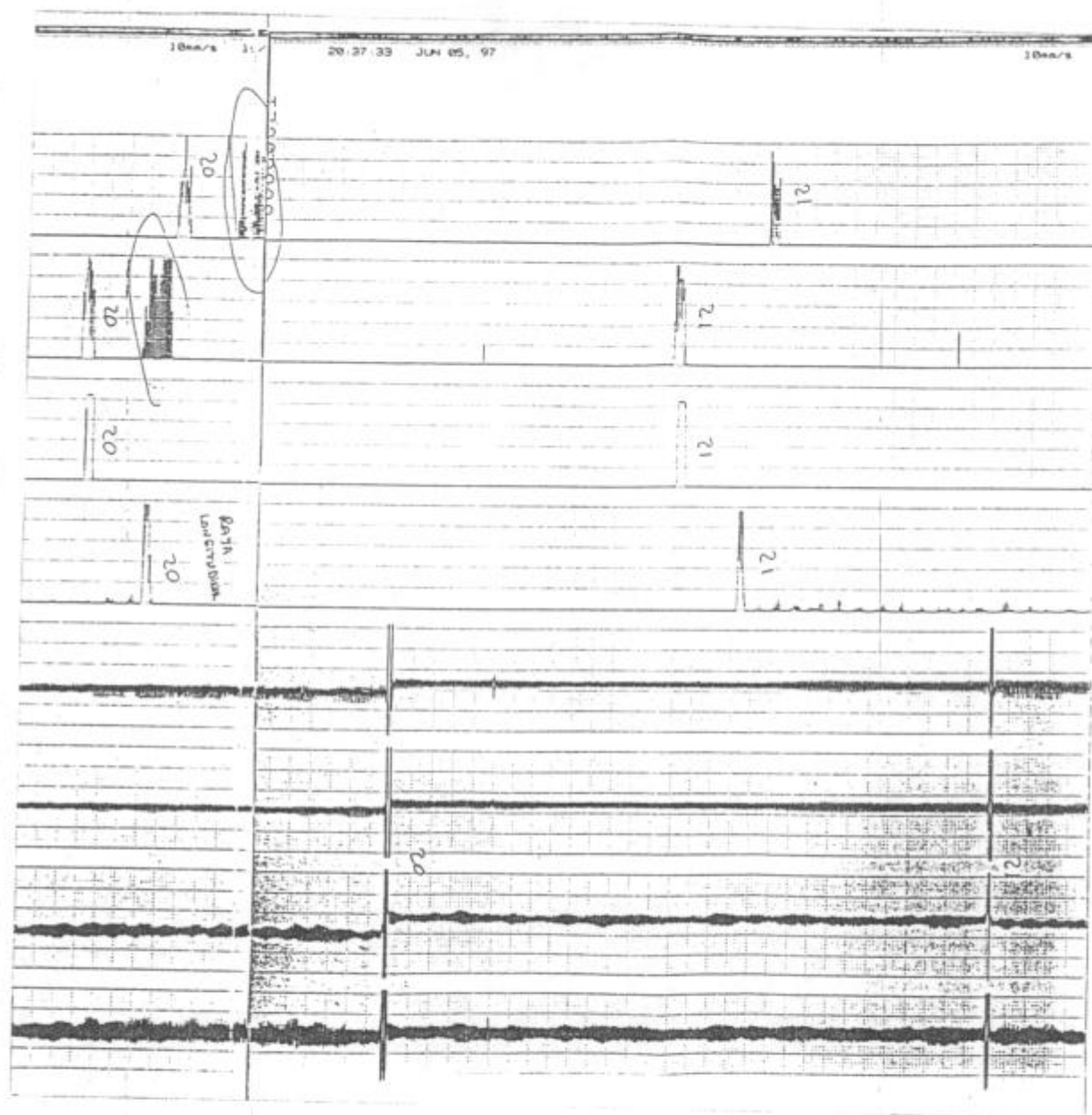


Fig. 29. Registro de ultrasonido correspondiente a una raya longitudinal

3.2.4- IMPRONTA

Visualmente aparece como una falta de material sobre la superficie de la vaina.



Fig. 30. Foto de una impronta con un aumento de 50 x

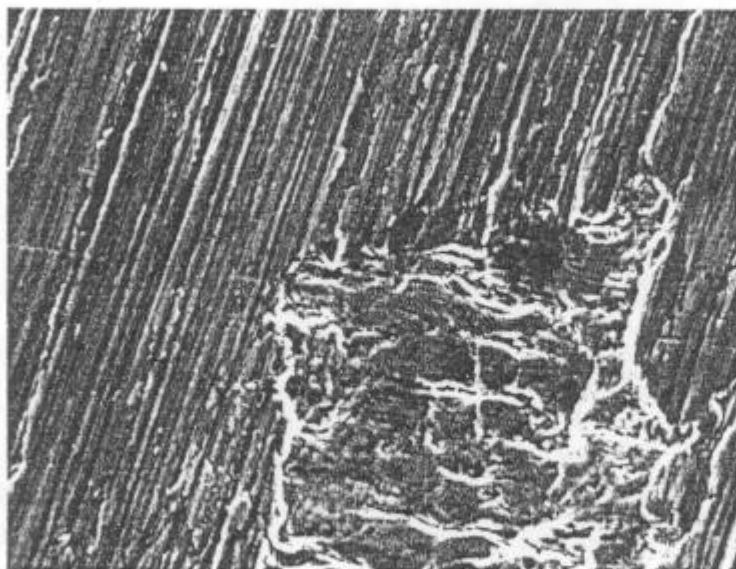


Fig. 31. Foto de una impronta con un aumento de 800 x

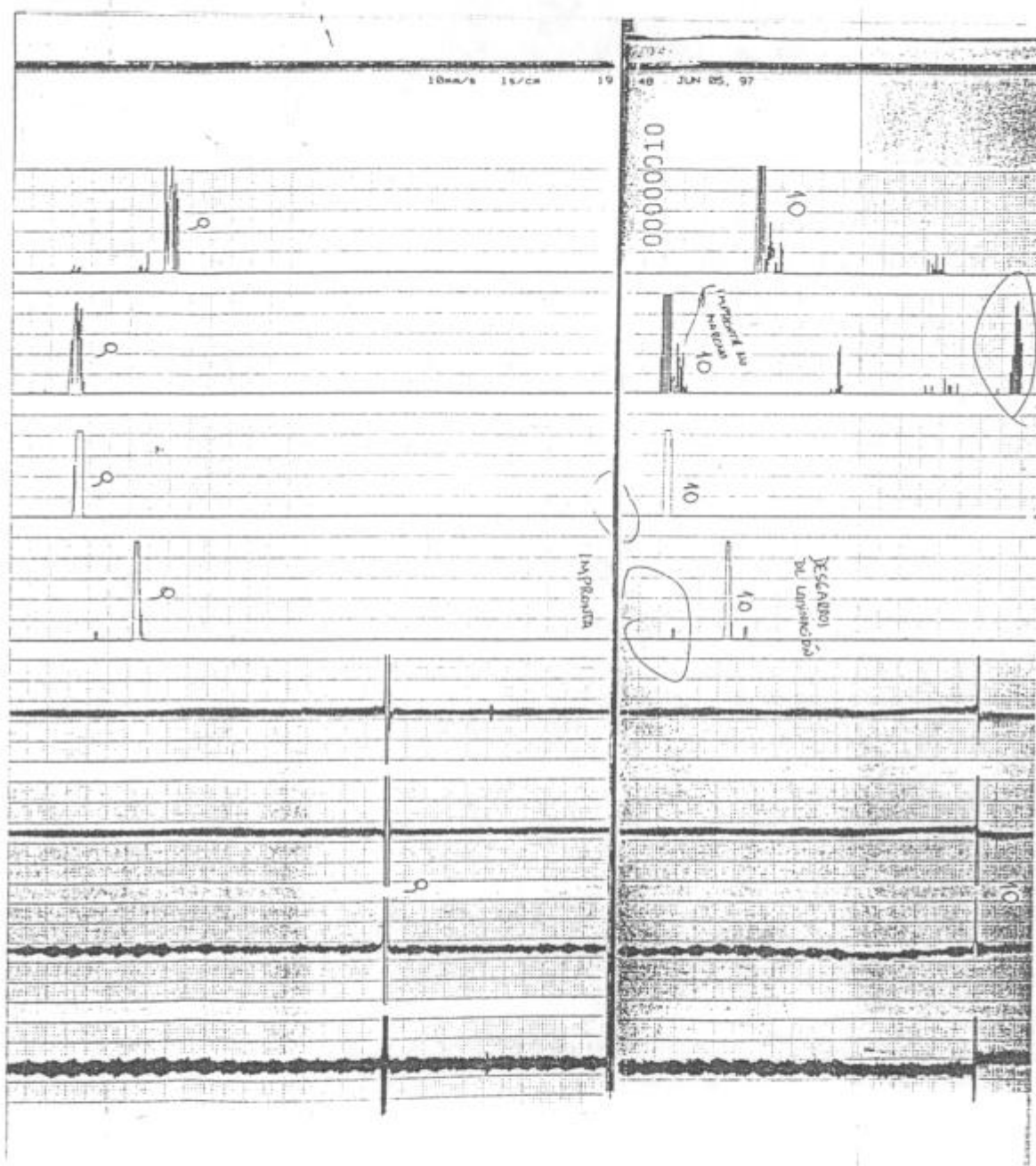


Fig. 32. Registro de ultrasonido correspondiente a una impronta

3.2.5- PUNTOS NEGROS ALINEADOS

Visualmente aparece como un conjunto de pequeñas improntas alineadas según la dirección del eje de la vaina sobre la superficie de la misma.

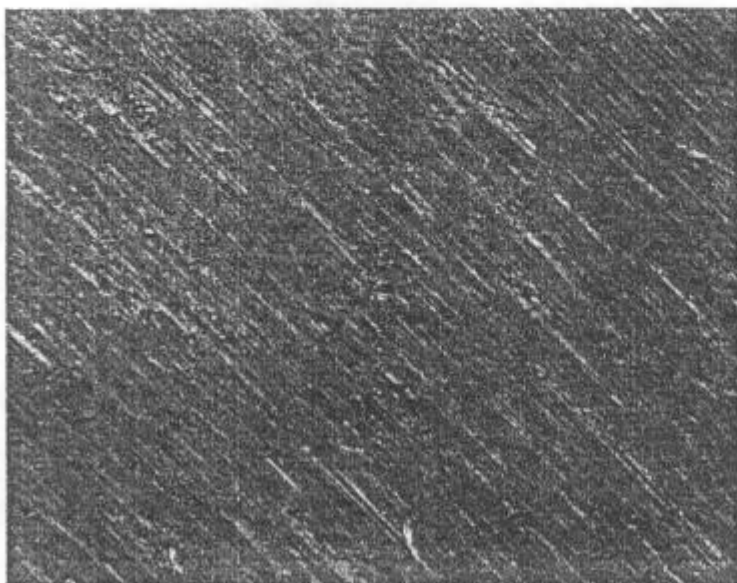


Fig. 33. Foto de puntos negros
alineados con un aumento de 100 x

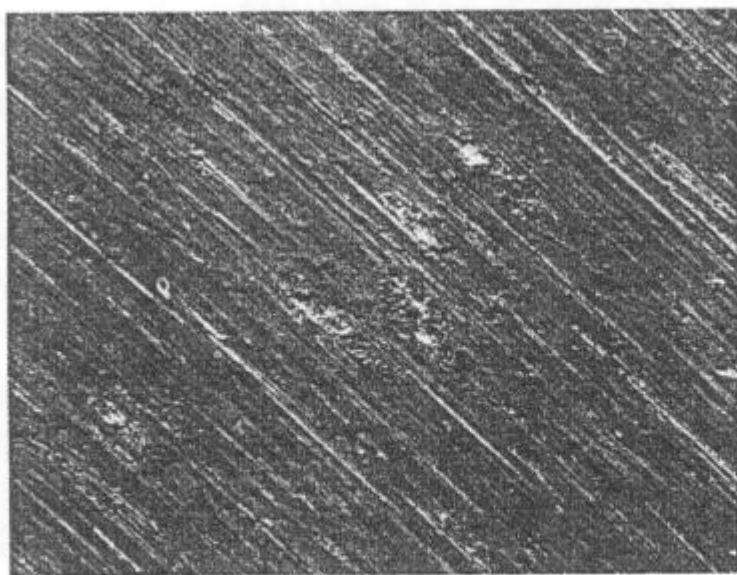


Fig. 34. Foto de puntos negros
alineados con un aumento de 200 x

3.2.6- FACETADO

Visualmente aparece como una acumulación del material sobre la superficie de la vaina.

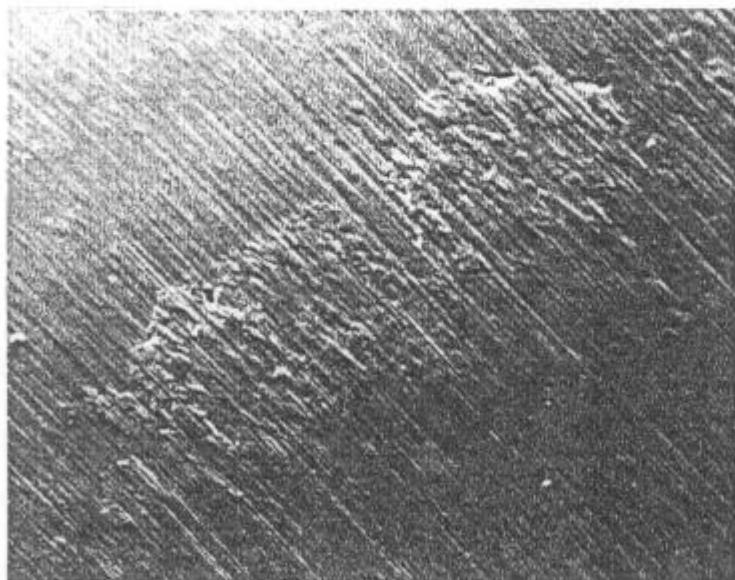


Fig. 36. Foto de un facetado con un aumento de 100 x

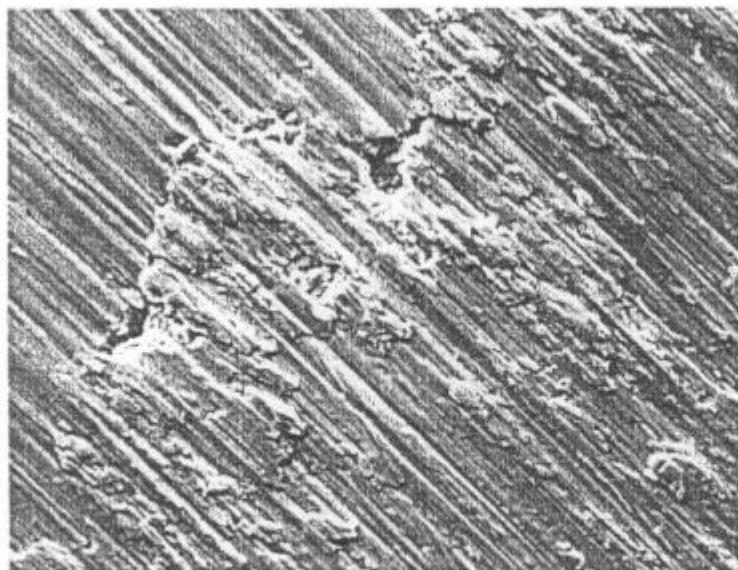


Fig.37 Foto de un facetado con un aumento de 400 x

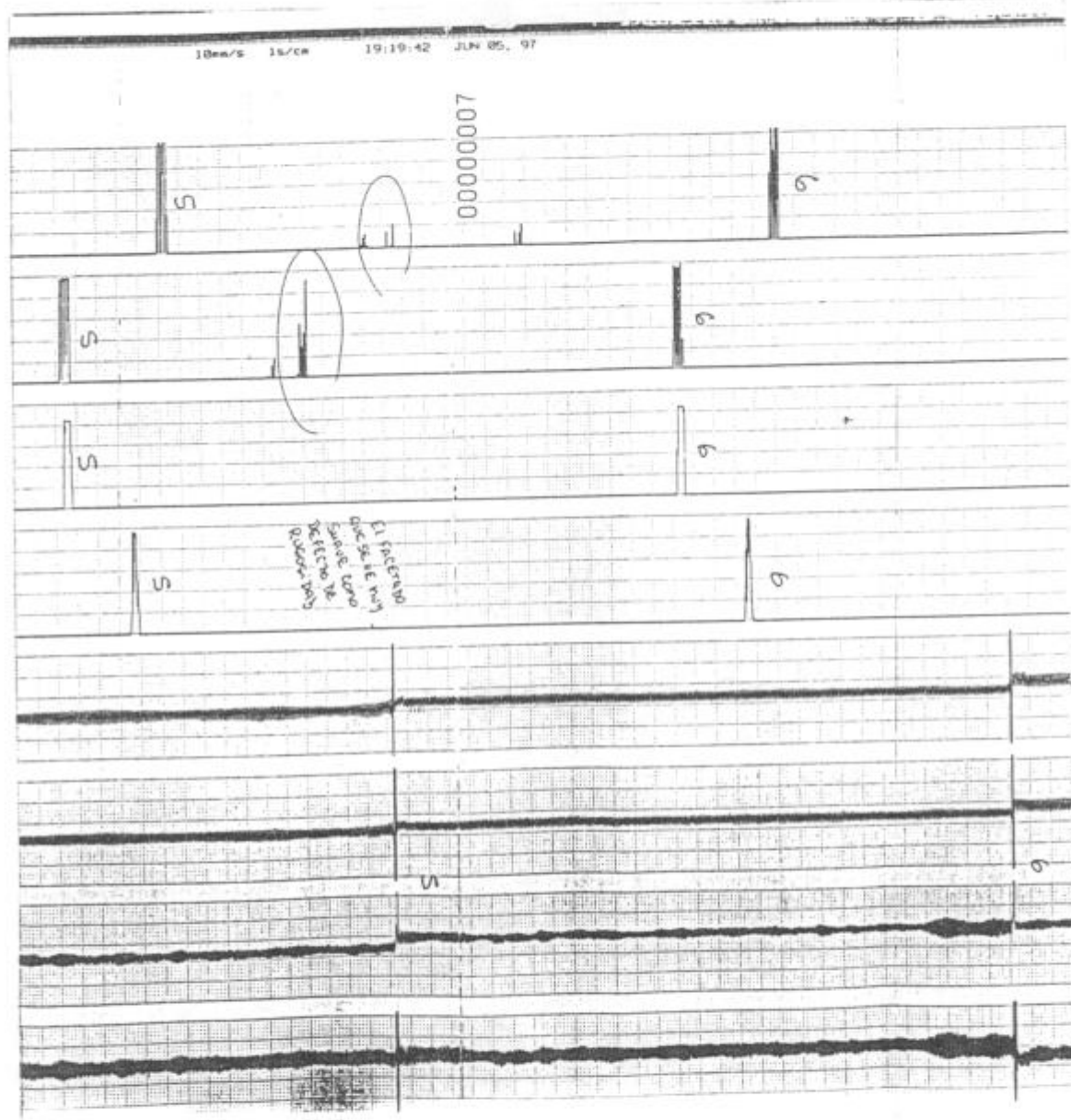


Fig. 38. Registro de ultrasonido correspondiente a un facetado

3.2.6- OVALIDAD

Se presenta este defecto cuando en alguna parte de la vaina la sección no es un círculo sino un óvalo. No se tomaron fotografías de este defecto.

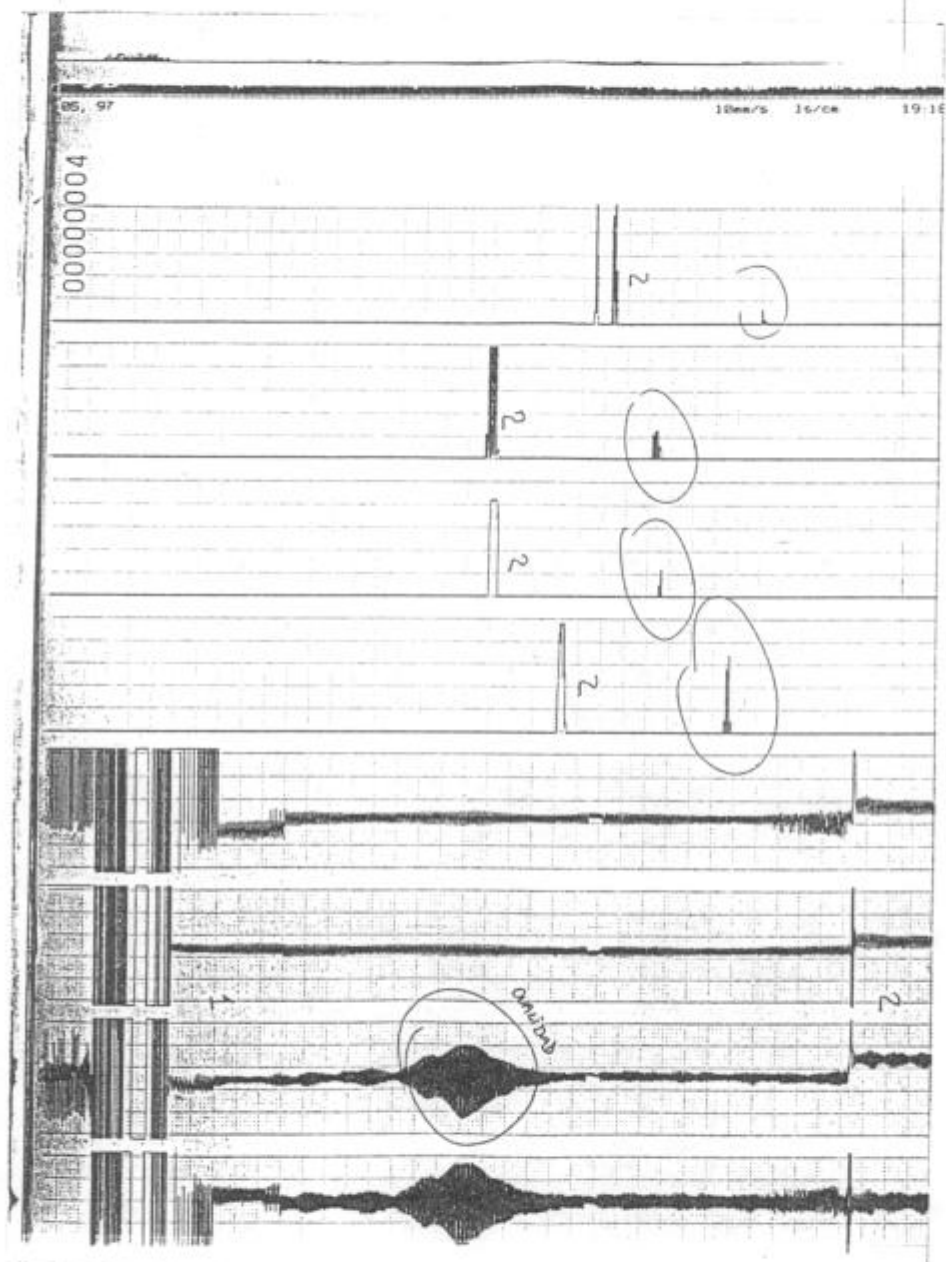


Fig. 39. Registro de ultrasonido correspondiente a una ovalidad

3.3- CARACTERIZACION DE LA FRACTURA

A través de todos los ensayos realizados se observó que el proceso que concluye con la explosión de la vaina es el mismo. A una cierta presión la vaina comienza a curvarse, "se abanana", posteriormente se forma una ampolla en la parte interna de la curvatura y en esa zona es donde finalmente se produce la fractura. Esta puede ser de dos formas, en este trabajo se las denomina fractura tipo "S" y fractura tipo "C". Las razones de por que se producen este tipo de fracturas se discutirán en el capítulo 4. A continuación se presentan fotos de ambos tipos de fractura:

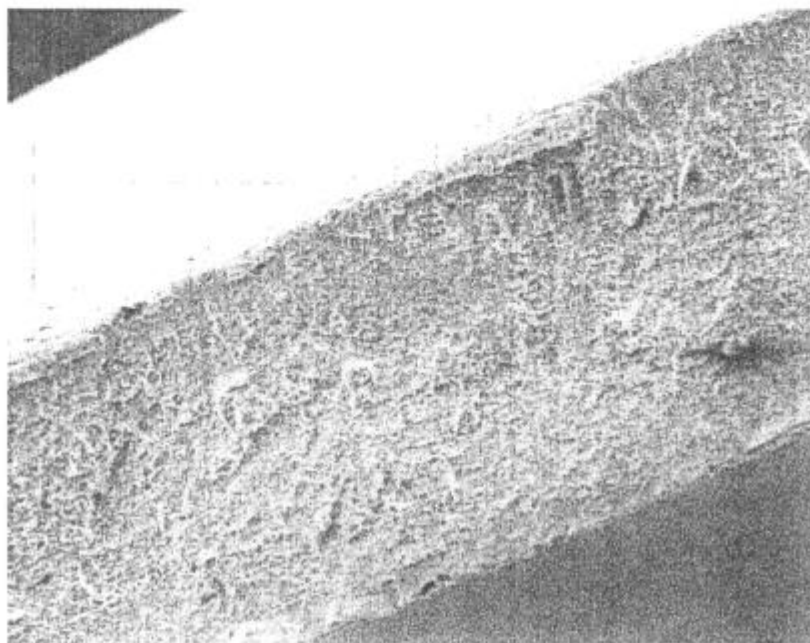
Fig. 40. Fractura tipo "S"

Fig. 41 . Fractura tipo "C"

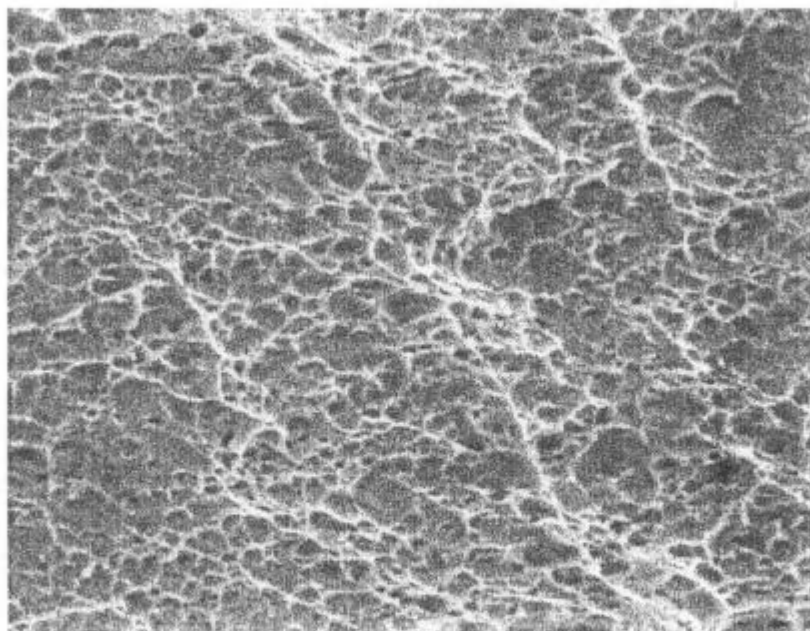
En los 36 ensayos realizados la fractura fue dúctil. Por fractura dúctil [9], se

entiende una forma de falla del material en la cual microcavidades existentes previamente o nucleadas durante la deformación crecen hasta que interactúan entre sí y se unen o coalescen para formar una discontinuidad interna o camino de fractura. Este proceso ocurre cuando todavía el material tiene una sección resistente apreciable. Como se puede observar en las figuras 40 y 41, la fractura se desarrolla apreciablemente en la dirección axial, en la concavidad del tubo ya distorsionado.

Mediante el MEB se efectuaron observaciones de las superficies de fractura (fig 42).



a)



b)

Fig 42. Superficie de fractura

Micrografías obtenidas con los siguientes aumentos: a) 200x b) 1600x

3.4- RESULTADOS DE LOS ENSAYOS

Como ya fue indicado, se realizaron 36 ensayos en vainas con y sin defectos. Los primeros 22 ensayos sirvieron fundamentalmente para poner a punto el equipo de presurización y los sensores. Se comprobó que los sensores Pinducers no daban buenos resultados y por esto se los reemplazó por los PAC, los que demostraron ser mucho mejores.. Debido a todas estas causas, no se listaran de manera detallada sus resultados. Se darán los resultados de los ensayos 23 a 36 (salvo los ensayos 26 y 32, los que no pudieron ser completados).

Con relación a los eventos producidos en cada ensayo, se realiza una distinción entre el número total de eventos y el número de eventos "válidos". El número total de eventos es la suma de todos los eventos captados por el AEDOS. De cada evento, este equipo suministra información tal como su amplitud (A), su duración (D) y su rise time (R). Es necesario señalar una serie de limitaciones que surgen del equipo. El amplificador del front end amplifica la señal, pero esta amplificación tiene como límite un valor máximo de 10 volts, si luego de ser amplificada la señal su amplitud fuera mayor que 10 volts, el amplificador se satura y recorta la señal a ese valor máximo, por esto, todo evento que presente una amplitud de 10 volts será considerado como un evento "no válido", ya que en realidad su amplitud es mayor que 10v y los valores de D y R no serán los correctos, y no será considerado cuando se realice el análisis de los eventos en el capítulo 4. Por otro lado se ha observado que ciertos eventos tienen un tiempo de subida superior a su duración. Esto (ver sección 1.5.2) no es posible, por lo que estos eventos también son considerados como no válidos. En particular hay un conjunto de eventos que tienen duración de 1 μ seg y un rise time mayor, se ha observado que estos eventos tienen una amplitud pequeña, no superior a los 1200mv, en mi opinión estos son eventos que debido a su pequeña amplitud no pueden ser correctamente adquiridos y analizados por el AEDOS, esta incerteza en cuanto a los verdaderos valores de sus parametros hace que no puedan ser tomados en cuenta para el análisis estadístico que se realizará en el capítulo 4.

Para cada ensayo se indica si la probeta tiene o no defectos y de que tipo son estos (ver sección 3.2), la presión a la que se produjo la rotura de la misma, que tipo de fractura se produjo (ver sección 3.3), el número de eventos totales y válidos, junto con el número de eventos digitalizados. Este número siempre es menor que el total de eventos, pues el osciloscopio digital guarda las señales en un disquette , por lo cual necesita un tiempo para grabar cada digitalización de por lo menos 1 seg, con lo que se pierde cualquier otro evento que se produzca en ese lapso de tiempo. También se presenta un pequeño esquema de las dimensiones (en mm) de la fractura (figuras a), y una serie de gráficos entregados por el AEDOS referidos a las variables más importantes involucradas. Estos gráficos son:

- i) Evolución temporal del ensayo: Se grafican la presión y la suma de los eventos en función del tiempo . Se grafican todos los eventos (figuras b).
- ii) Eventos en función de su duración. Se grafican los eventos válidos (figuras c).
- iii) Eventos en función de su amplitud. Se grafican todos los eventos (figuras d).
- iv) Eventos en función de su rise time. Se grafican los eventos válidos (figuras e).
- v) Eventos en función de la presión. Se grafican todos los eventos (figuras f).

- vi) tasa de eventos en función del tiempo. Se grafican todos los eventos (figuras g).
- vii) Eventos en función de su energía. Se grafican los eventos válidos (figuras h).

En la siguiente tabla se dan los resultados de todos los ensayos efectuados:

TABLA V
RESULTADOS DE LOS ENSAYOS

VAINA	ARCHIVO	TIPO DE DEFECTO	PRESION DE ROTURA (psi)	EVENTOS TOTALES	EVENTOS VALIDOS	EVENTOS DIGITALIZADOS
1	-	-	6800	-	-	-
2	-	-	6800	-	-	-
3	-	-	6800	-	-	-
4	-	-	6400	-	-	-
5	ARI1	-	6800	26	21	-
6	ARI2	-	6800	3	3	-
7	ARI3	-	7500	3	2	-
8	ARI4	RAYAS	7100	4	4	-
9	ARI5	RAYAS	7510	7	6	-
10	ARI10	RAYAS	7510	15	7	-
11	ARI11	-	7645	8	5	-
12	ARI12	MARCA DE SIERRA	7510	6	2	-
13	ARI13	-	7370	2	2	-
14	ARI14	-	7782	10	7	-
15	ARI15	-	7370	5	5	-
16	ARI16	-	7510	11	8	-
17	ARI17	LONGITUD MENOR	7510	6	3	-
18	ARI18	-	7100	3	3	3
19	ARI19	-	7100	111	99	23
20	ARI20	-	7510	40	39	-
21	ARI21	-	6690	1340	X	289
22	ARI22	-	6826	26	9	21
23	ARI23	-	7850	35	25	-
24	ARI24	IMPRONTA	6736	181	113	48
25	ARI25	-	X	59	37	31
26	ARI26	-	X	83	X	-
27	ARI27	IMPRONTA	7545	32	15	7
28	ARI28	FACETADO	7814	238	155	60
29	ARI29	-	7814	231	138	46
30	ARI30	-	7949	162	105	36
31	ARI31	-	7949	87	51	28

VAINA	ARCHIVO	TIPO DE DEFECTO	PRESION DE ROTURA (psi)	EVENTOS TOTALES	EVENTOS VALIDOS	EVENTOS DIGITALIZADOS
32	ARI32	-	7814	313	227	33
33	ARI33	-	7814	99	62	32
34	ARI34	DESGARRO	7275	37	23	18
35	ARI35	UÑAZO	6871	105	66	36
36	ARI36	OVALIDAD	7545	42	18	19

3.4.1- ENSAYO 23

Probeta: Sin defectos

Presión de rotura: 7200 psi

Forma de la fractura: C

Eventos totales: 78

Eventos válidos: 25

Eventos digitalizados: -

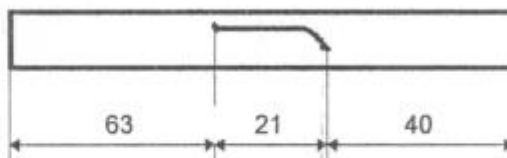


Fig. 43a Croquis de la probeta luego del ensayo

En las figuras 43b 43h se presentan los distintos gráficos entregados por el equipo AEDOS que sirven para caracterizar cada uno de los ensayos.

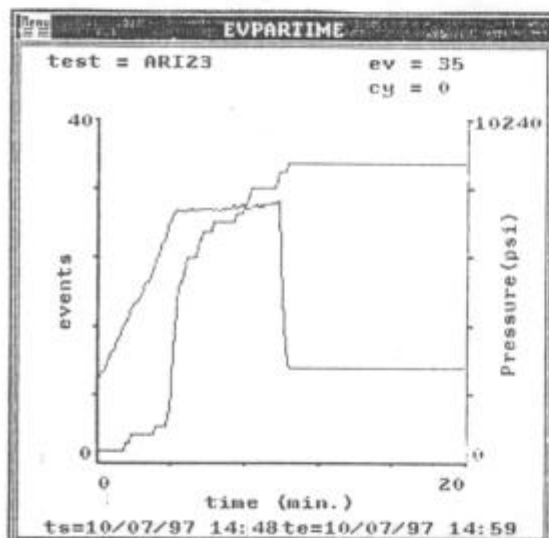


Fig. 43b. Eventos y presión en función del tiempo

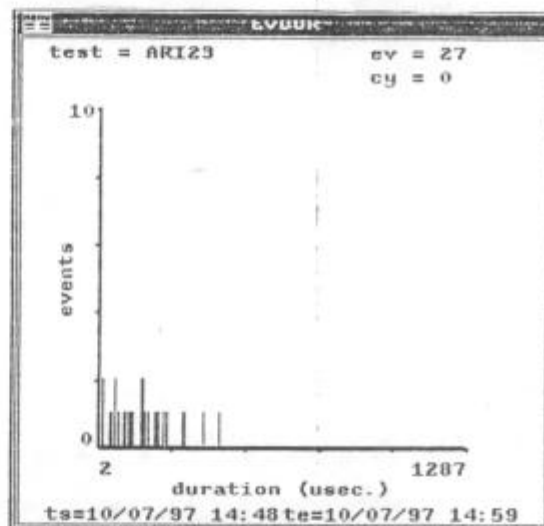


Fig. 43c. Eventos en función de su duración

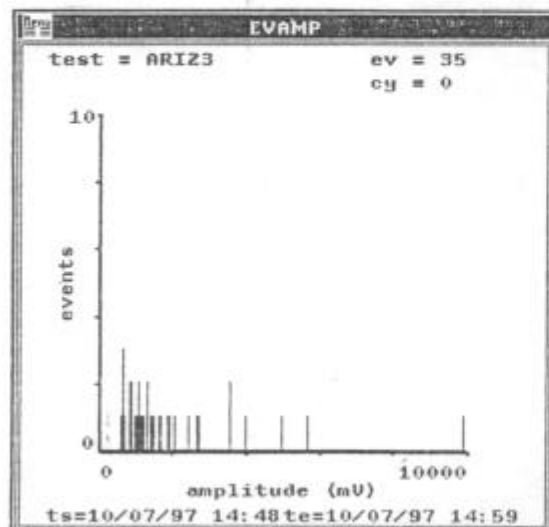


Fig. 43d. Eventos en función de la amplitud

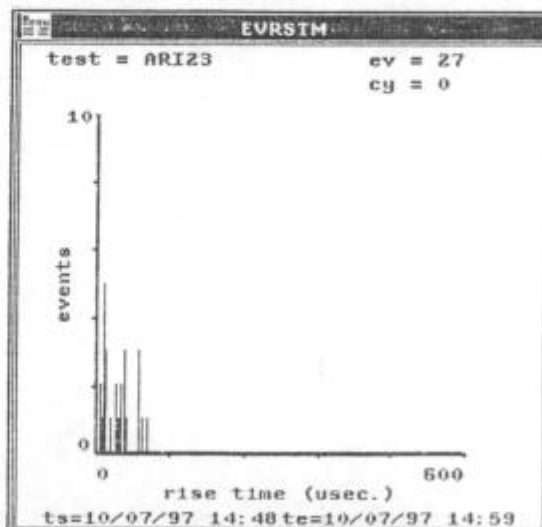
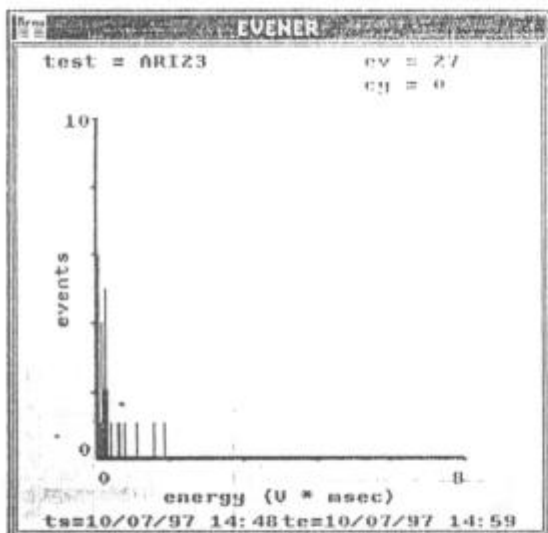
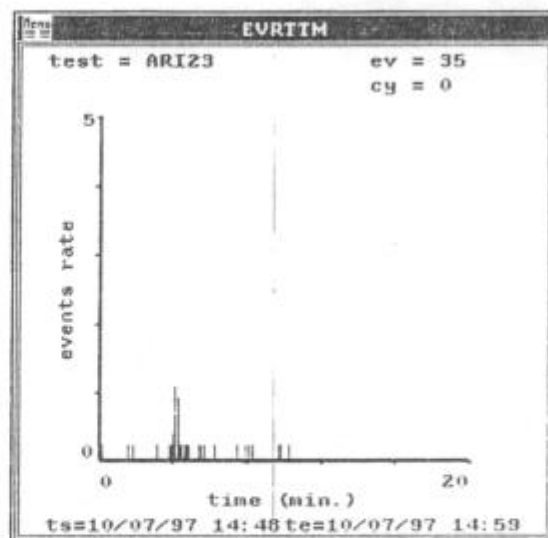
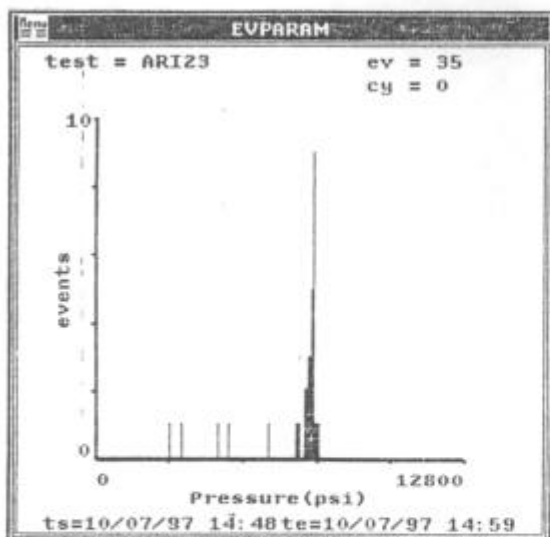


Fig. 43e. Eventos en función del rise time



3.4.2- ENSAYO 24

Probeta: Con impronta

Presión de rotura: 6736 psi

Forma de la fractura: C

Eventos totales: 181

Eventos válidos: 113

Eventos digitalizados: 48

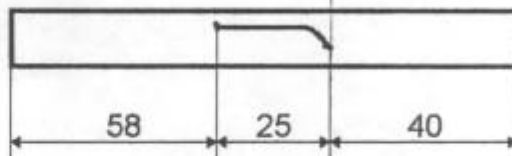


Fig. 44a. Croquis de la probeta luego del ensayo

En las figuras 44b a 44h se presentan los distintos gráficos entregados por el equipo AEDOS que sirven para caracterizar cada uno de los ensayos.

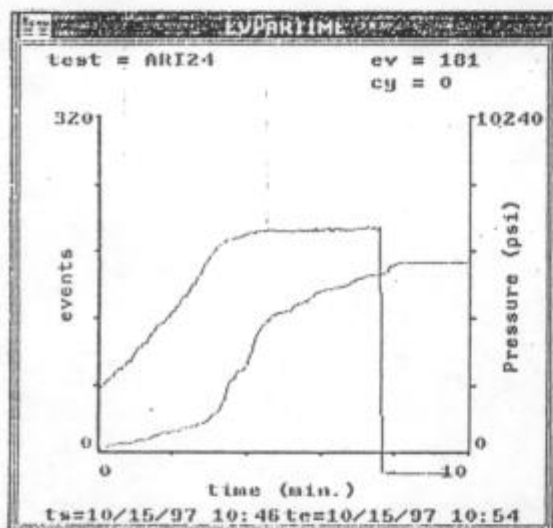


Fig. 44b. Eventos y presión en función del tiempo

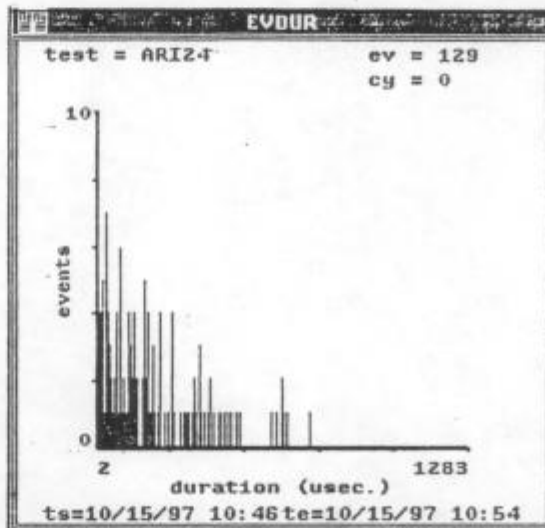


Fig. 44c. Eventos en función de su duración

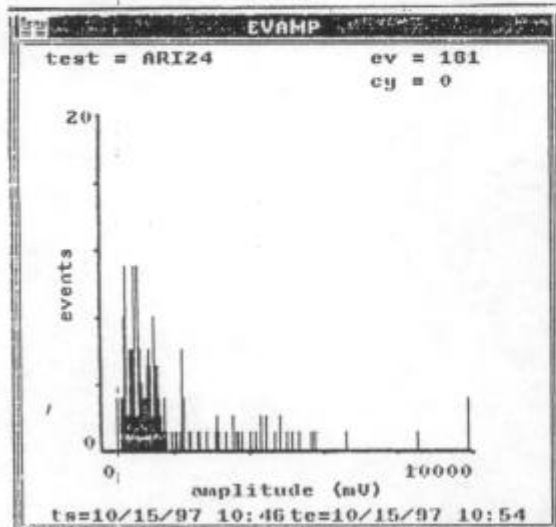


Fig. 44d. Eventos en función de la amplitud

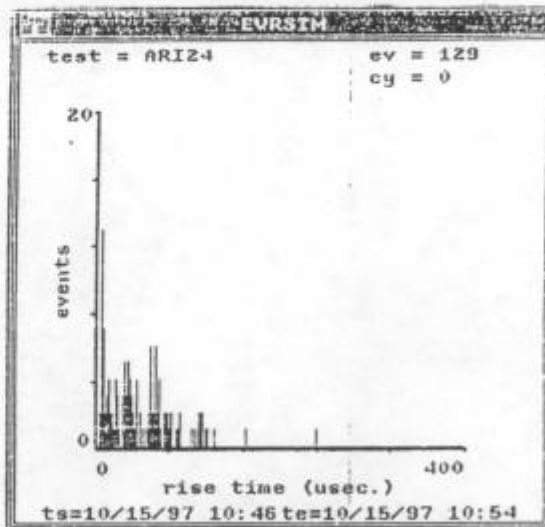
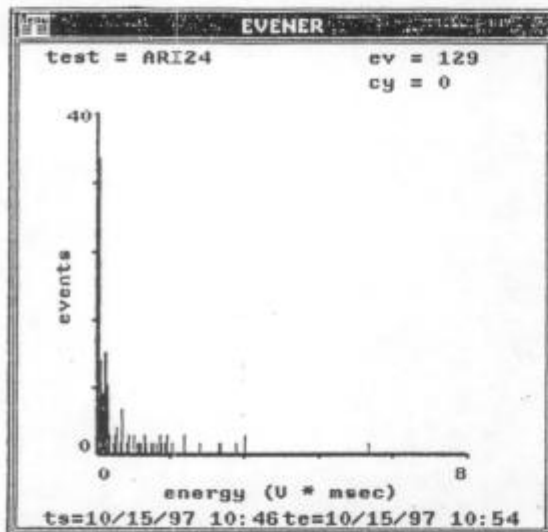
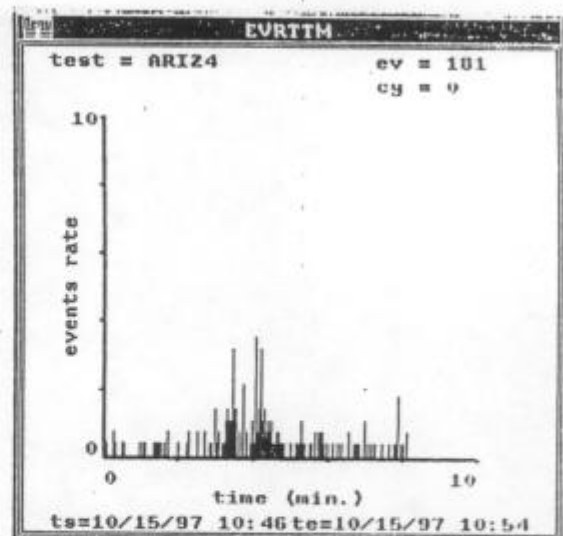
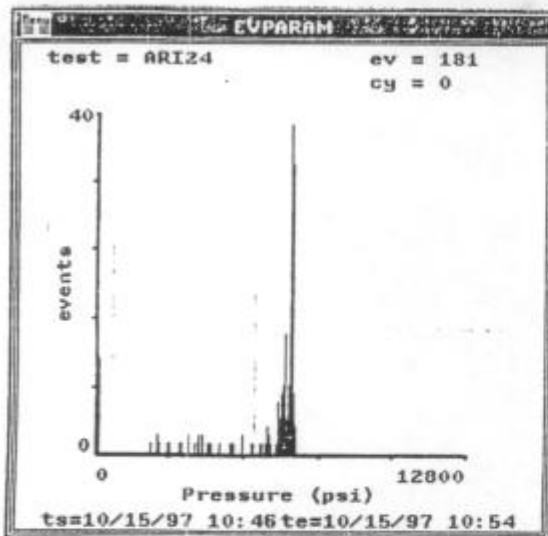


Fig. 44e. Eventos en función del rise time



3.4.3- ENSAYO 25

Probeta: Sin defectos

Presión de rotura: -

Forma de la fractura: C

Eventos totales: 59

Eventos válidos: 37

Eventos digitalizados: 31

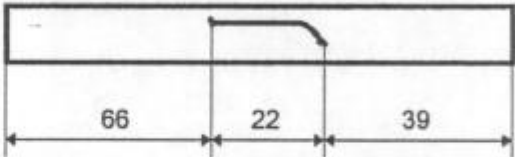


Fig. 45a Croquis de la probeta luego del ensayo

En las figuras 45b a 45h se presentan los distintos gráficos entregados por el equipo AEDOS que sirven para caracterizar cada uno de los ensayos.

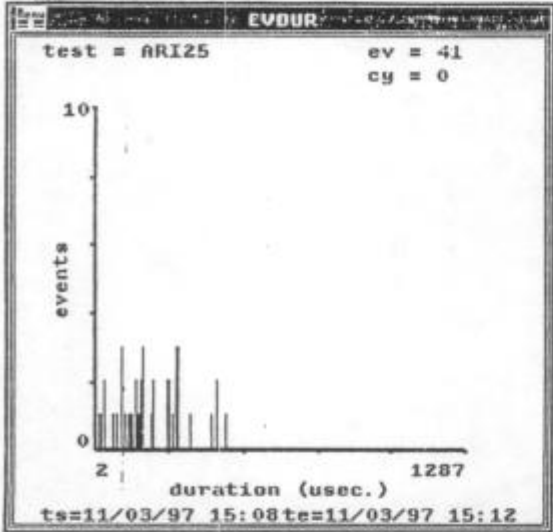


Fig. 45c. Eventos en función de su duración

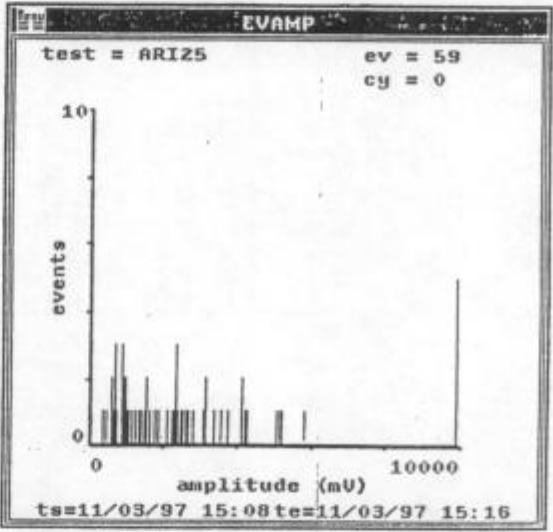


Fig. 45d. Eventos en función de la amplitud

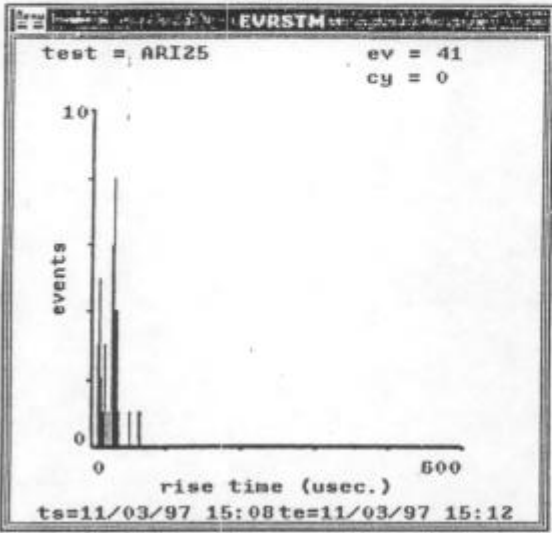


Fig. 45e. Eventos en función del rise time

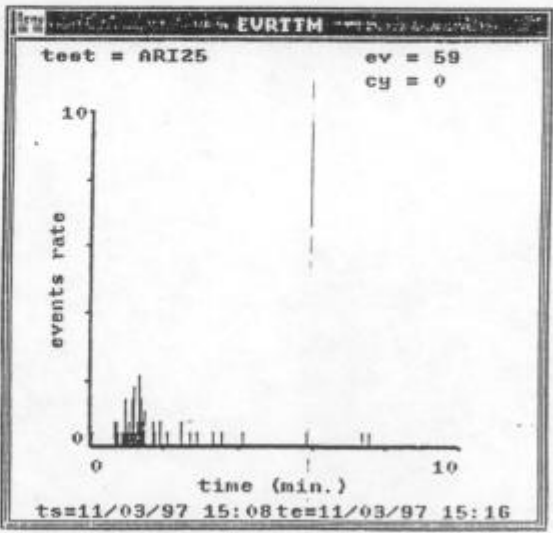


Fig. 45g. Tasa de eventos en función del tiempo

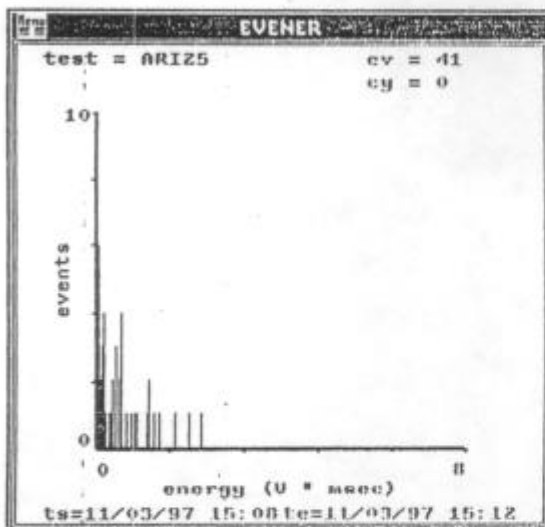


Fig. 45h Eventos en función de su energía

3.4.4- ENSAYO 27

Probeta: Con impronta

Presión de rotura: 7545 psi

Forma de la fractura: S

Eventos totales: 32

Eventos válidos: 15

Eventos digitalizados: 7

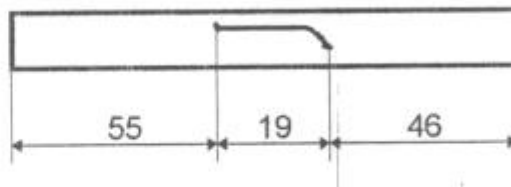


Fig. 46a Croquis de la probeta luego del ensayo

En las figuras 46b a 46h se presentan los distintos gráficos entregados por el equipo AEDOS que sirven para caracterizar cada uno de los ensayos.

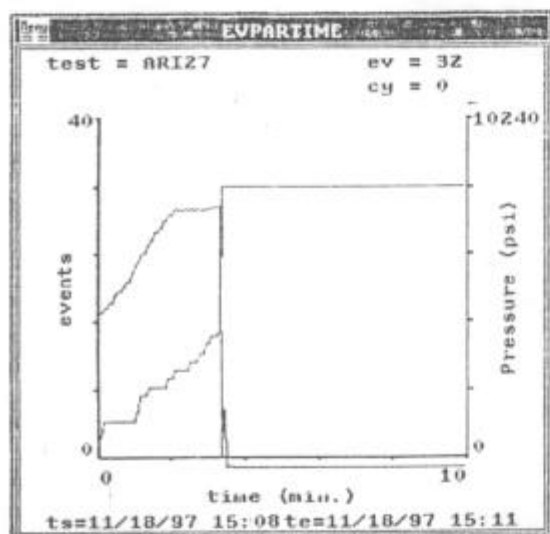


Fig. 46b. Eventos y presión en función del tiempo

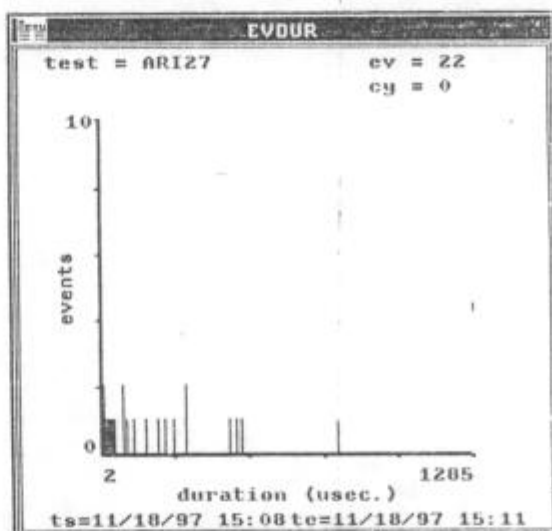


Fig. 46c. Eventos en función de su duración

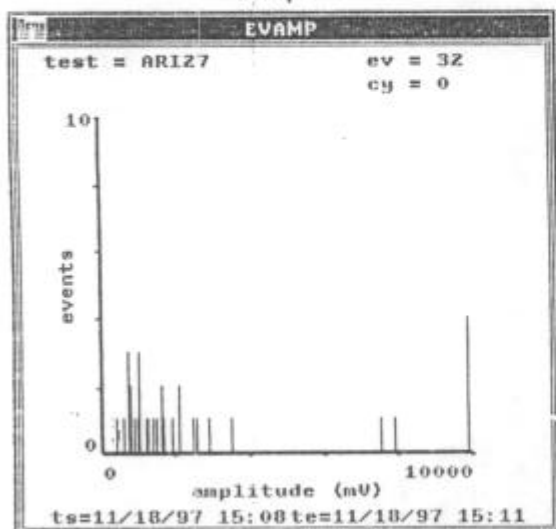


Fig. 46d. Eventos en función de la amplitud

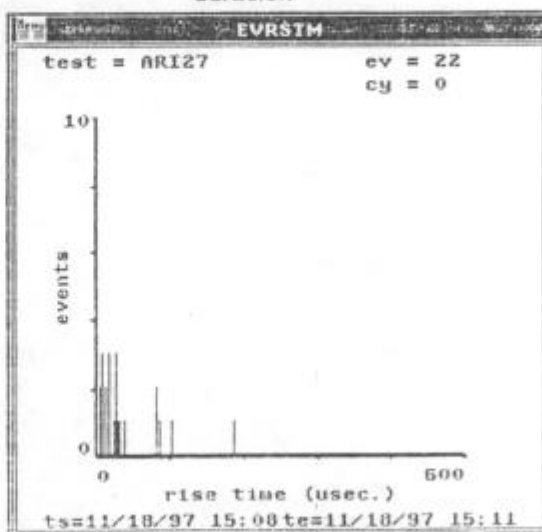


Fig. 46e. Eventos en función del rise time

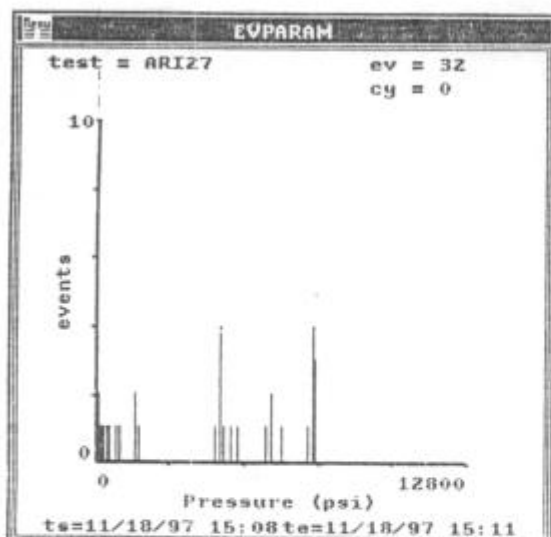


Fig. 46f. Eventos en función de la presión

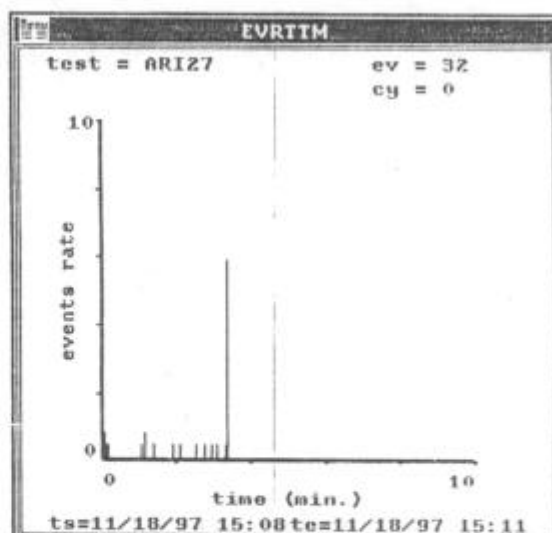


Fig. 46g. Tasa de eventos en función del tiempo

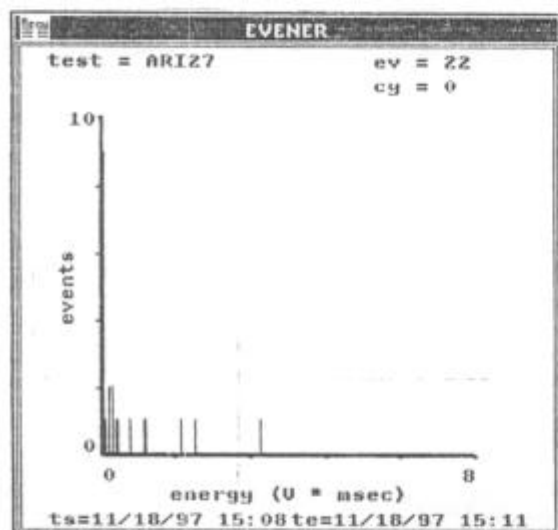


Fig. 46h. Eventos en función de su energía

3.4.5- ENSAYO 28

Probeta: Con facetado

Presión de rotura: 7814 psi

Forma de la fractura: C

Eventos totales: 238

Eventos válidos: 155

Eventos digitalizados: 60

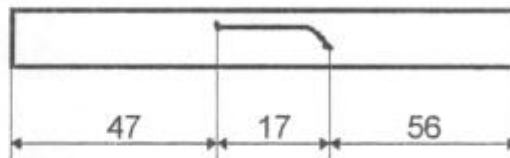


Fig. 47a Croquis de la probeta luego del ensayo

En las figuras 47b a 47h se presentan los distintos gráficos entregados por el equipo AEDOS que sirven para caracterizar cada uno de los ensayos.

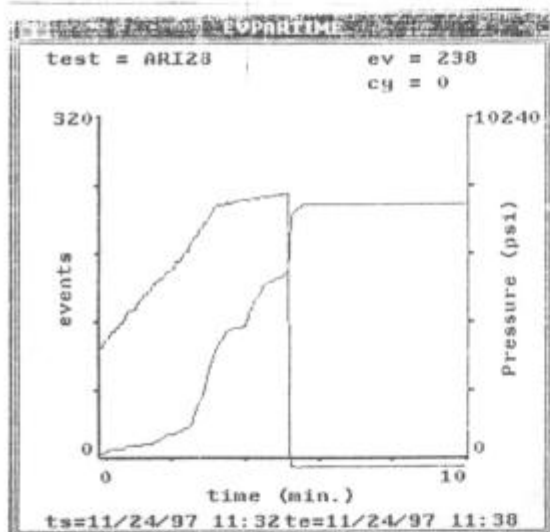


Fig. 47b. Eventos y presión en función del tiempo

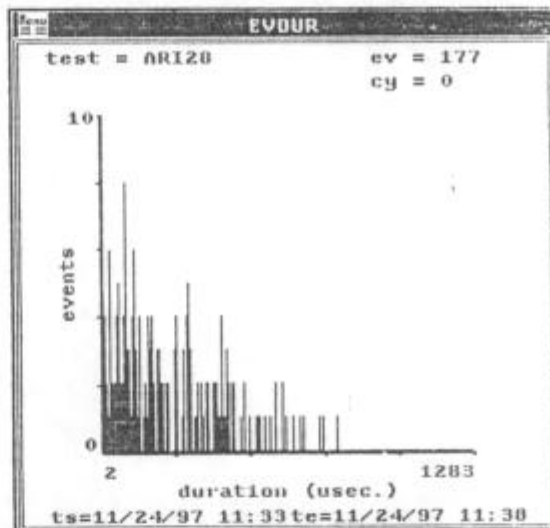


Fig. 47c. Eventos en función de su duración

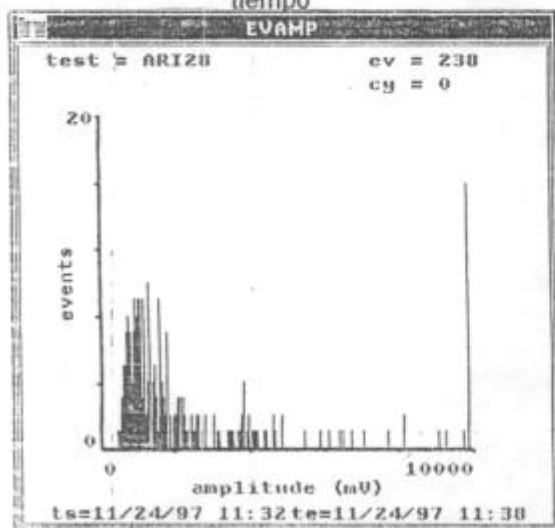


Fig. 47d. Eventos en función de la amplitud

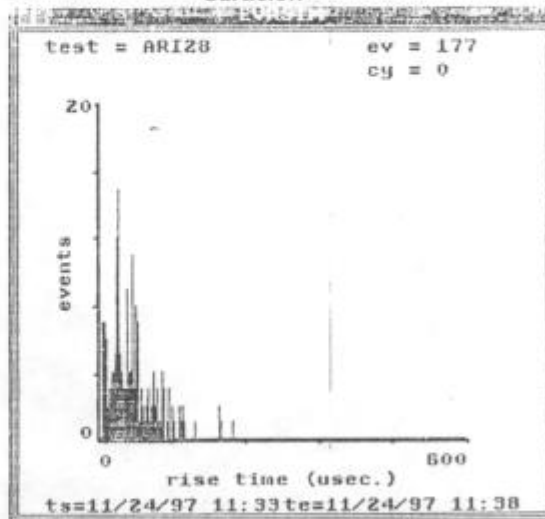


Fig. 47e. Eventos en función del rise time

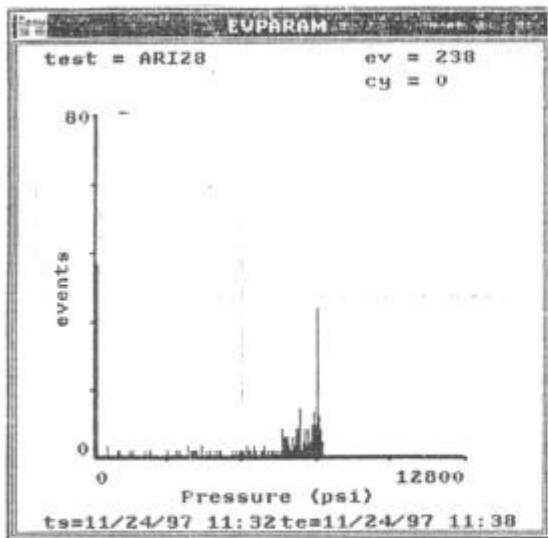


Fig. 47f. Eventos en función de la presión

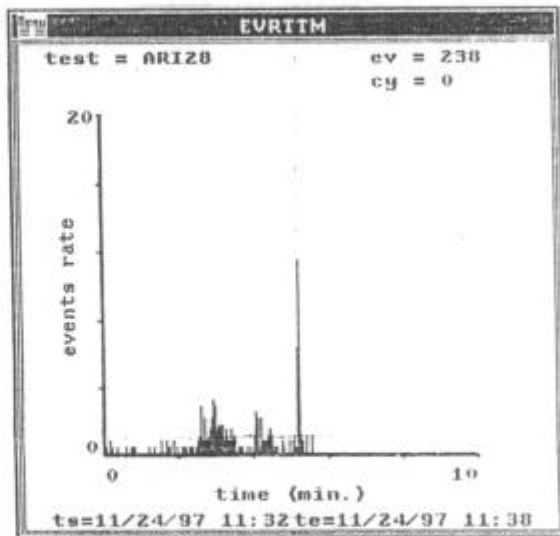


Fig. 47g. Tasa de eventos en función del tiempo

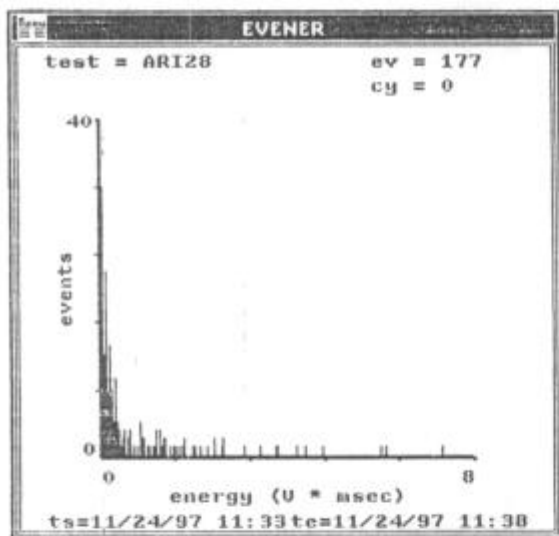


Fig. 47h Eventos en función de su energía

3.4.6- ENSAYO 29

Probeta: Sin defectos

Presión de rotura: 7814 psi

Forma de la fractura: S

Eventos totales: 231

Eventos válidos: 138

Eventos digitalizados: 46

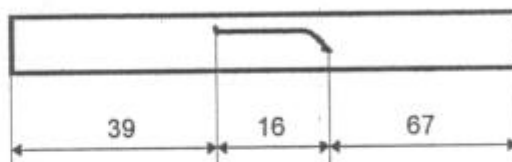


Fig. 48a Croquis de la probeta luego del ensayo

En las figuras 48b a 48h se presentan los distintos gráficos entregados por el equipo AEDOS que sirven para caracterizar cada uno de los ensayos.

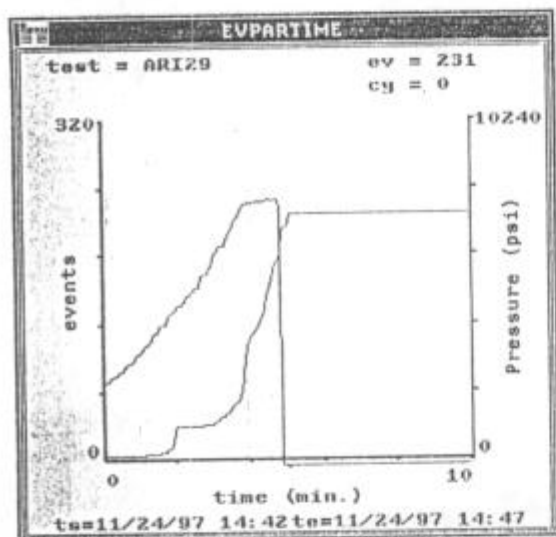


Fig. 48b. Eventos y presión en función del tiempo

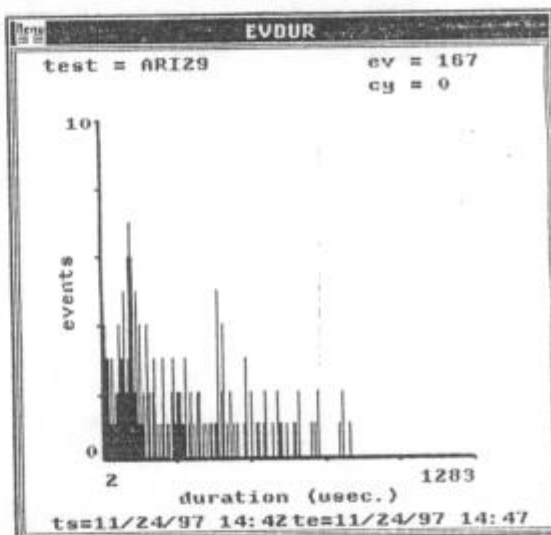


Fig. 48c. Eventos en función de su duración

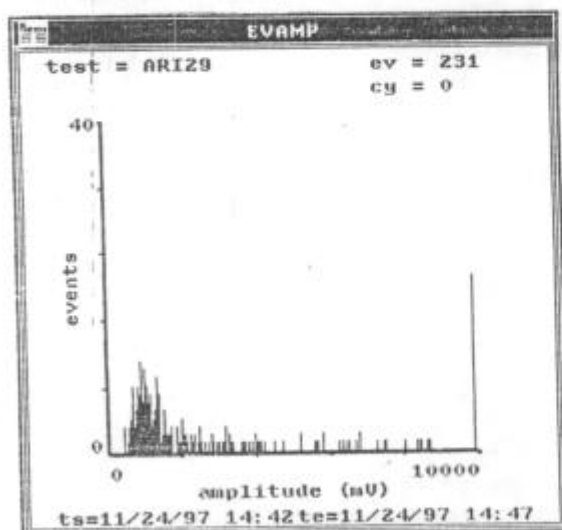


Fig. 48d. Eventos en función de la amplitud

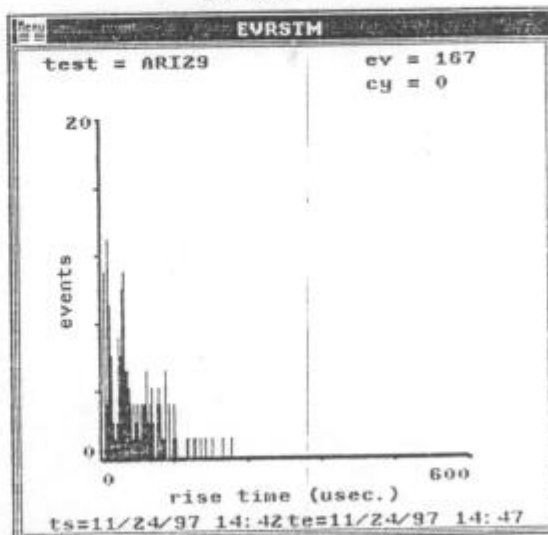


Fig. 48e. Eventos en función del rise time

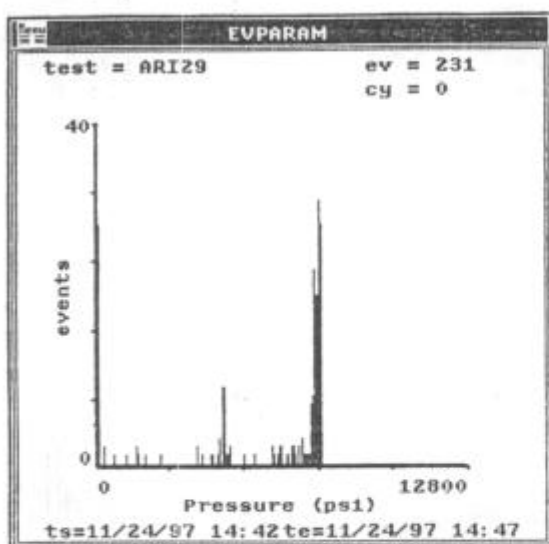


Fig. 48f. Eventos en función de la presión

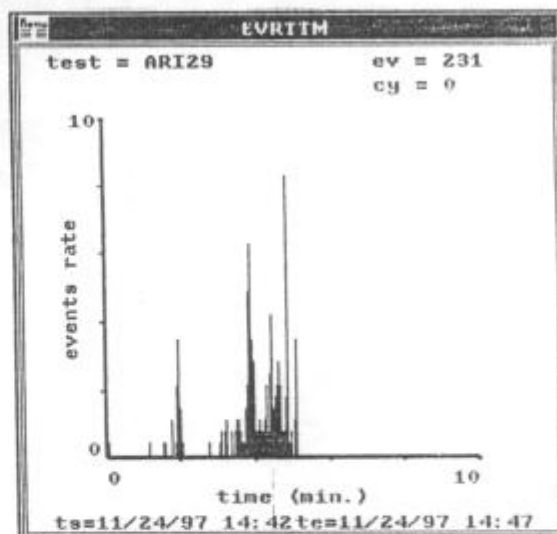


Fig. 48g. Tasa de eventos en función del tiempo

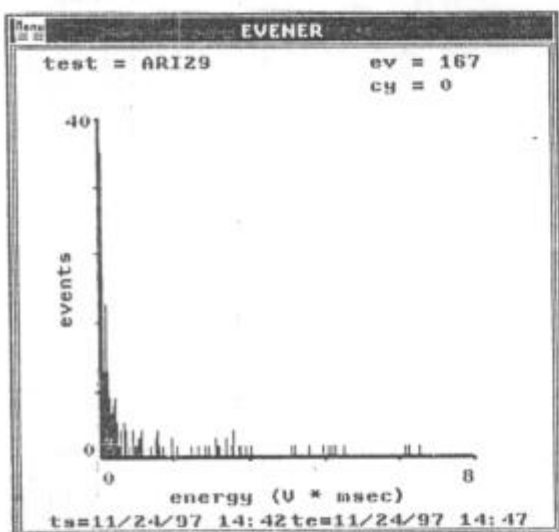


Fig. 48h Eventos en función de su energía

3.4.7- ENSAYO 30

Probeta: Sin defectos

Presión de rotura: 7949 psi

Forma de la fractura: C

Eventos totales: 162

Eventos válidos: 105

Eventos digitalizados: 36

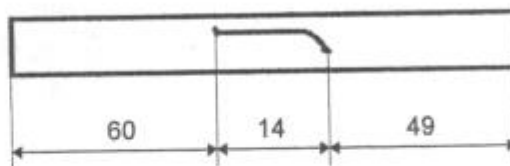


Fig. 49a Croquis de la probeta luego del ensayo

En las figuras 49b a 49h se presentan los distintos gráficos entregados por el equipo AEDOS que sirven para caracterizar cada uno de los ensayos.

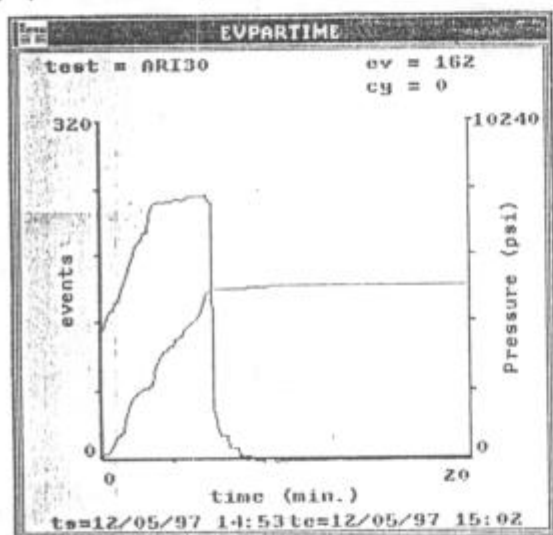


Fig. 49b. Eventos y presión en función del tiempo

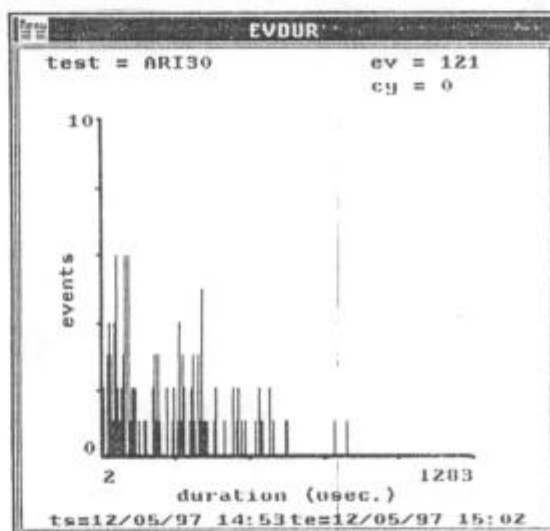


Fig. 49c. Eventos en función de su duración

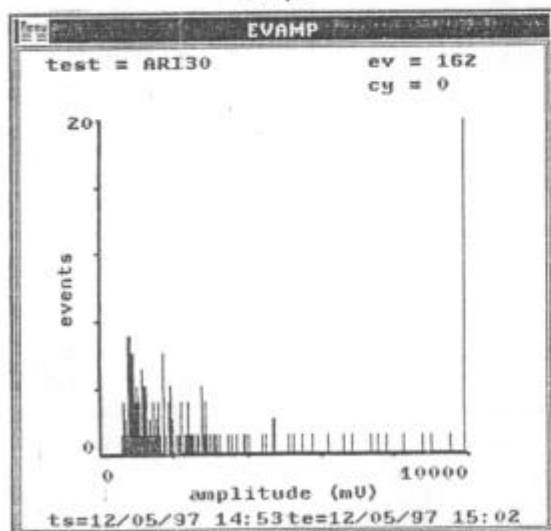


Fig. 49d. Eventos en función de la amplitud

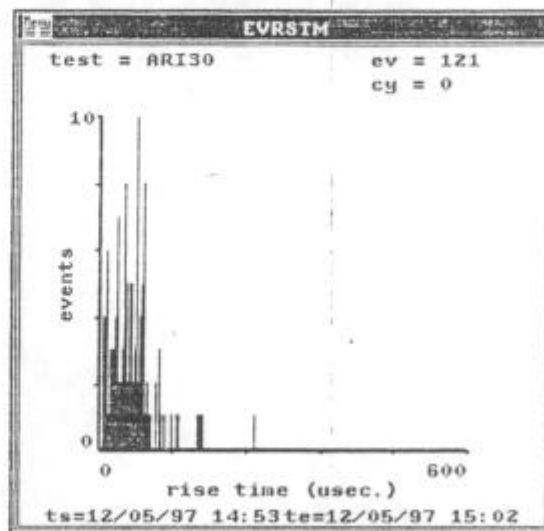


Fig. 49e. Eventos en función del rise time

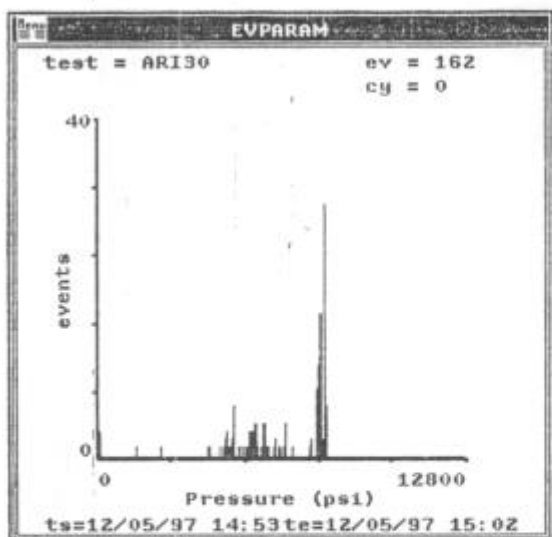


Fig. 49f. Eventos en función de la presión

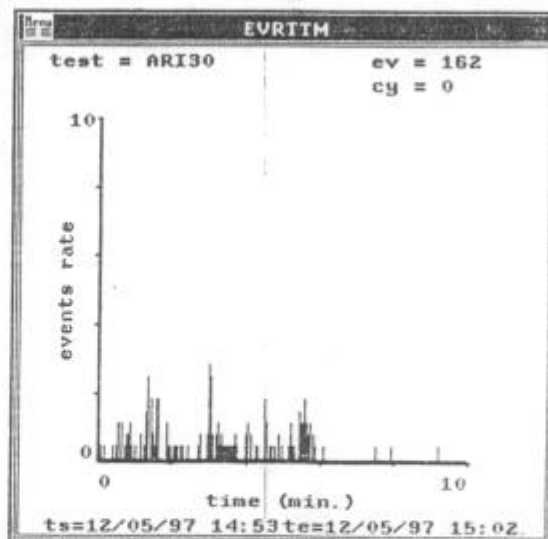


Fig. 49g. Tasa de eventos en función del tiempo

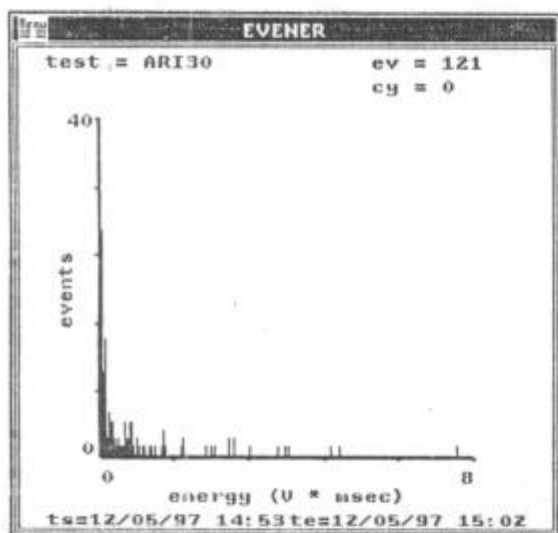


Fig. 49h Eventos en función de su energía

3.4.8- ENSAYO 31

Probeta: Sin defectos

Presión de rotura: 7949 psi

Forma de la fractura: C

Eventos totales: 87

Eventos válidos: 51

Eventos digitalizados: 28

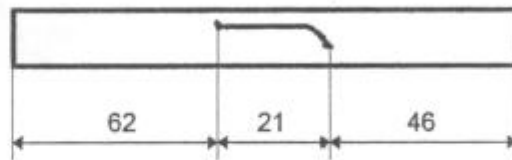


Fig. 50a Croquis de la probeta luego del ensayo

En las figuras 50b a 50h se presentan los distintos gráficos entregados por el equipo AEDOS que sirven para caracterizar cada uno de los ensayos.

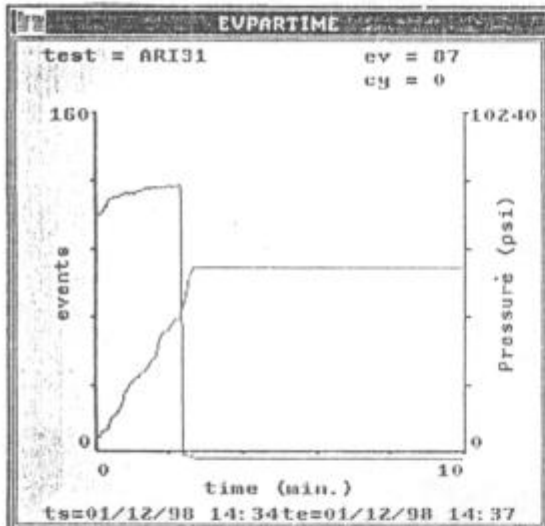


Fig. 50b. Cantidad total de eventos y presión en función del tiempo

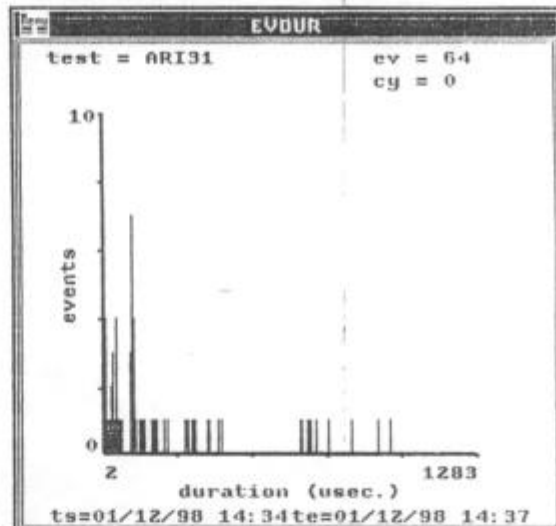


Fig. 50c. Eventos en función de su duración

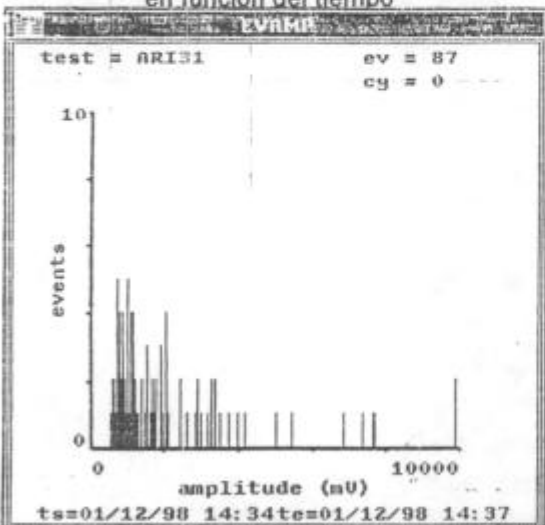


Fig. 50d. Eventos en función de la amplitud

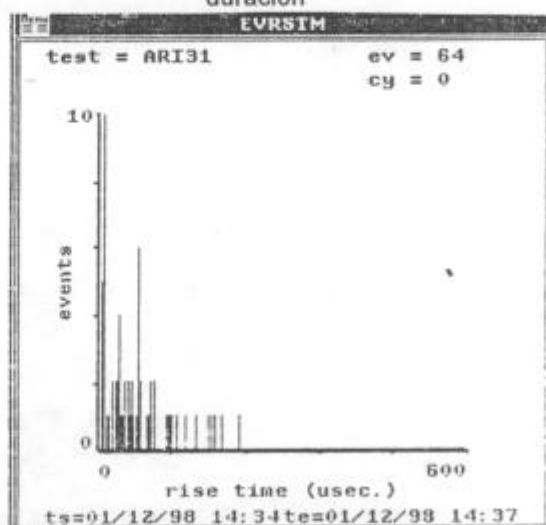


Fig. 50e. Eventos en función del rise time

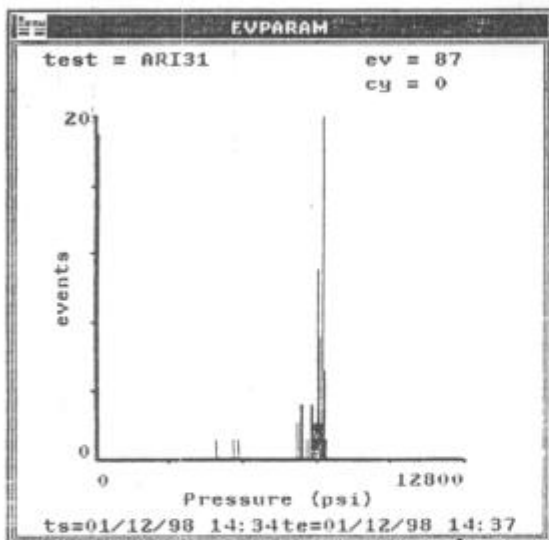


Fig. 50f. Eventos en función de la presión

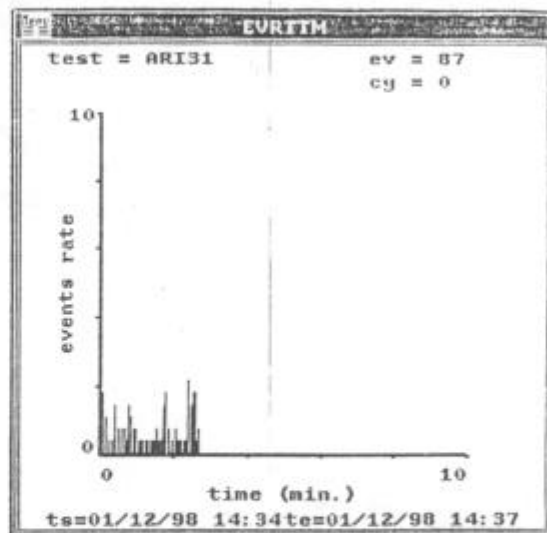


Fig. 50g. Tasa de eventos en función del tiempo

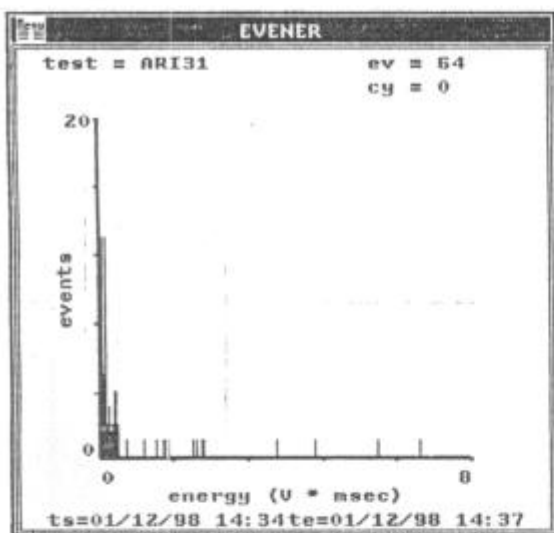


Fig. 50h Eventos en función de su energía

3.4.9- ENSAYO 33

Probeta: Sin defectos

Presión de rotura: 7814 psi

Forma de la fractura: S

Eventos totales: 99

Eventos válidos: 62

Eventos digitalizados: 32

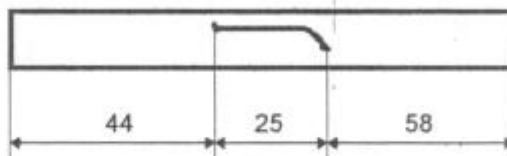


Fig.51a Croquis de la probeta luego del ensayo

En las figuras 51b a 51h se presentan los distintos gráficos entregados por el equipo AEDOS que sirven para caracterizar cada uno de los ensayos.

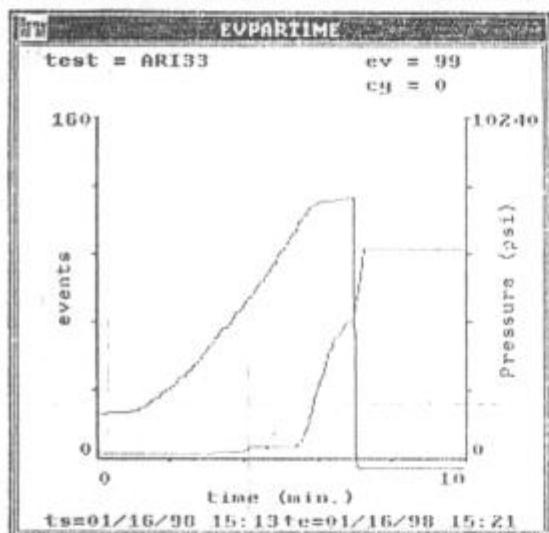


Fig. 51b. Cantidad total de eventos y presión en función del tiempo

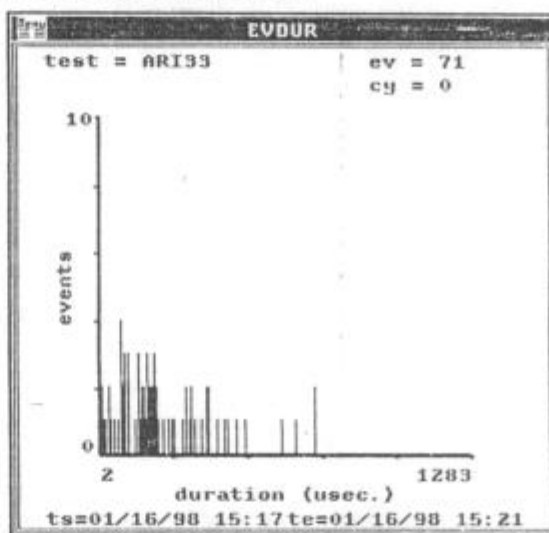


Fig. 51c. Eventos en función de su duración

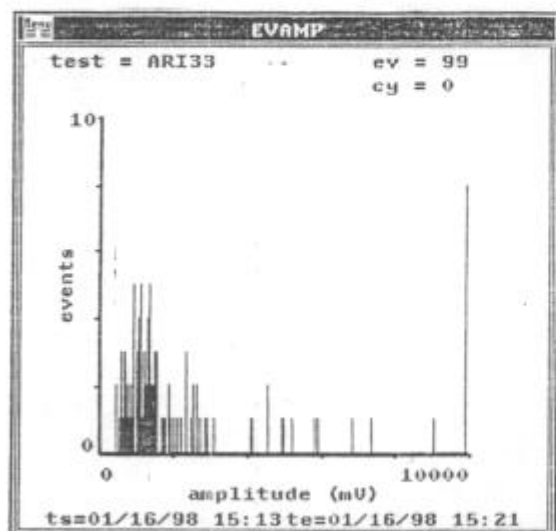


Fig. 51d. Eventos en función de la amplitud

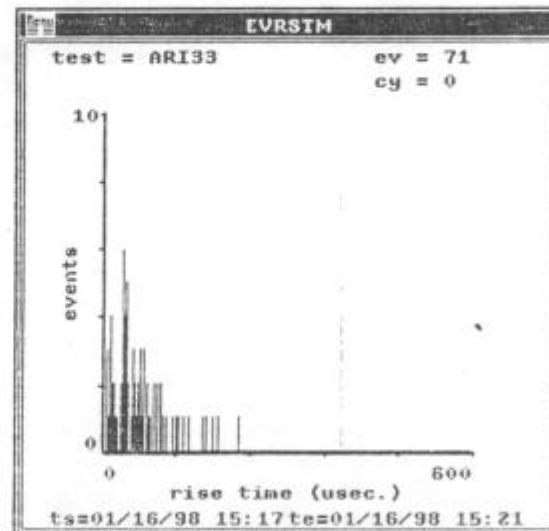


Fig. 51e. Eventos en función del rise time

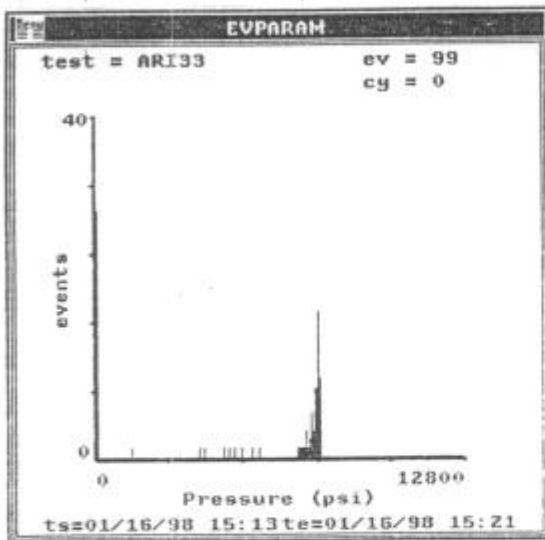


Fig. 51f. Eventos en función de la presión

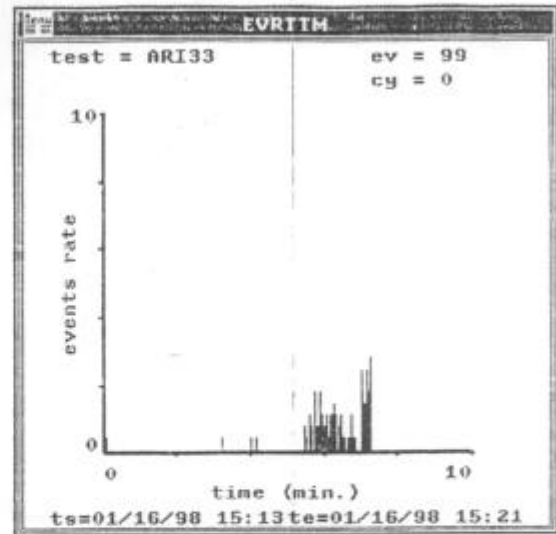


Fig. 51g. Tasa de eventos en función del tiempo

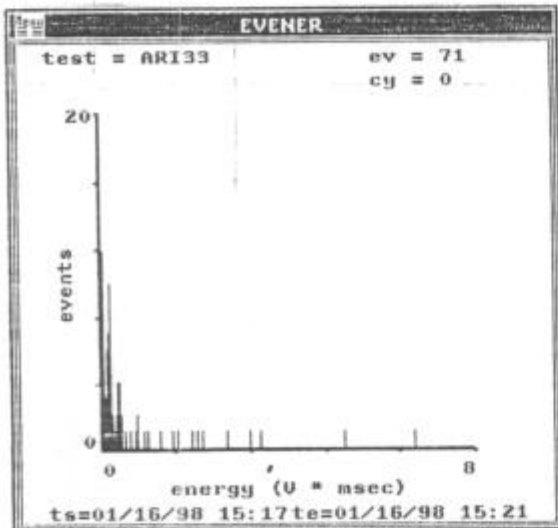


Fig. 51h Eventos en función de su energía

3.4.10- ENSAYO 34

Probeta: Con desgarr

Presión de rotura: 7275 psi

Forma de la fractura: S

Eventos totales: 37

Eventos válidos: 23

Eventos digitalizados: 18

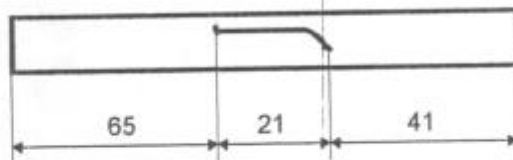


Fig. 52a Croquis de la probeta luego del ensayo

En las figuras 52b a 52h se presentan los distintos gráficos entregados por el equipo AEDOS que sirven para caracterizar cada uno de los ensayos.

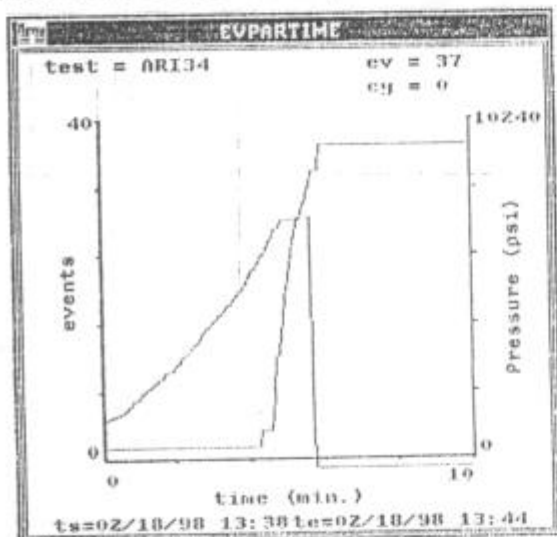


Fig. 52b. Cantidad total de eventos y presión en función del tiempo

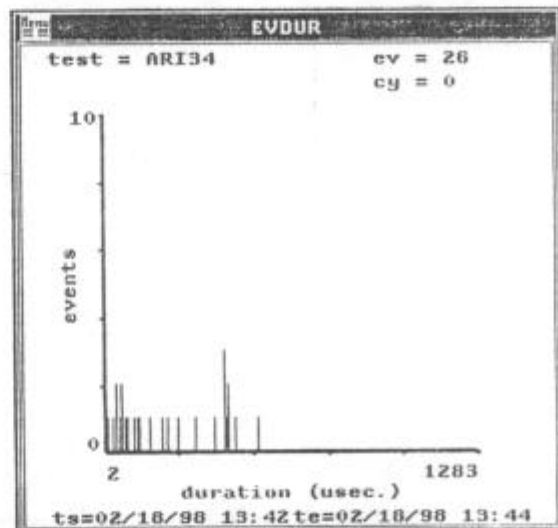


Fig. 52c. Eventos en función de su duración

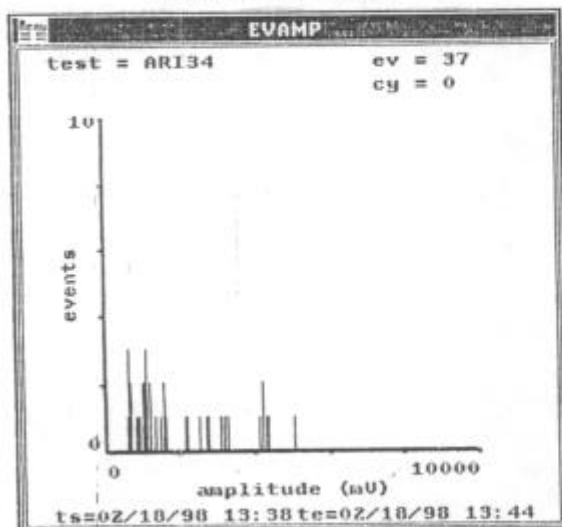


Fig. 52d. Eventos en función de la amplitud

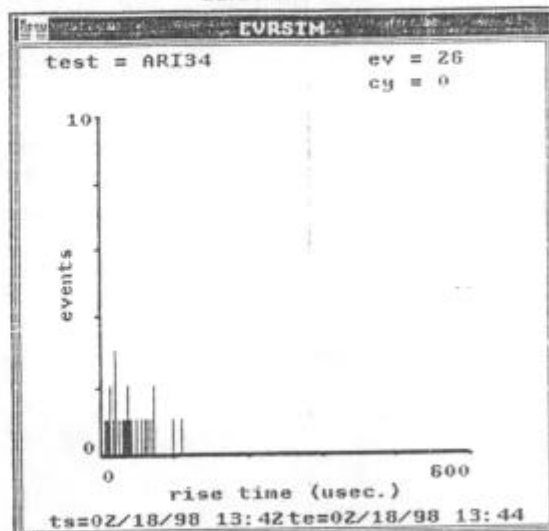


Fig. 52e. Eventos en función del rise time

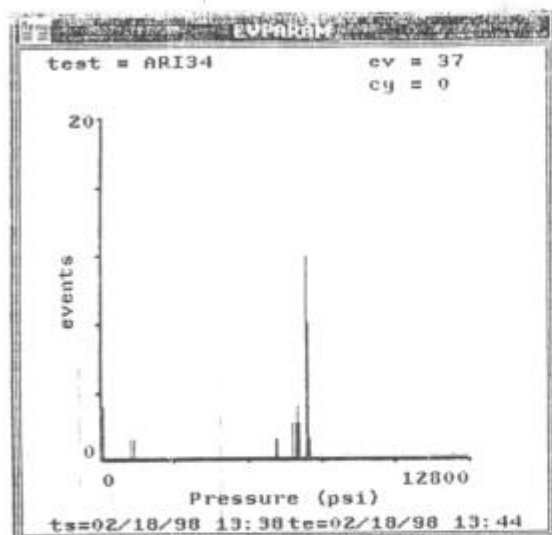


Fig. 52f. Eventos en función de la presión

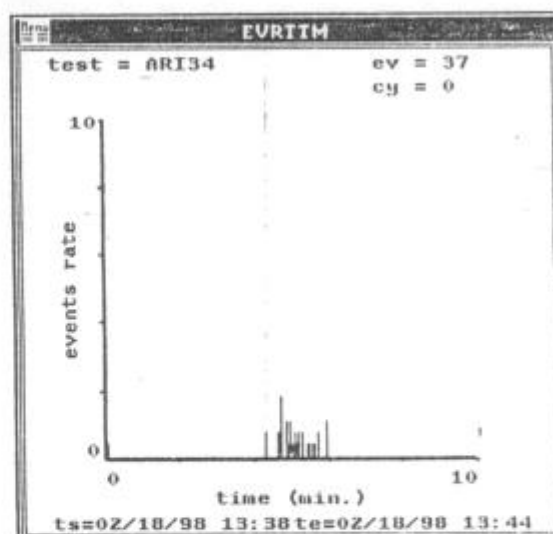


Fig. 52g. Tasa de eventos en función del tiempo

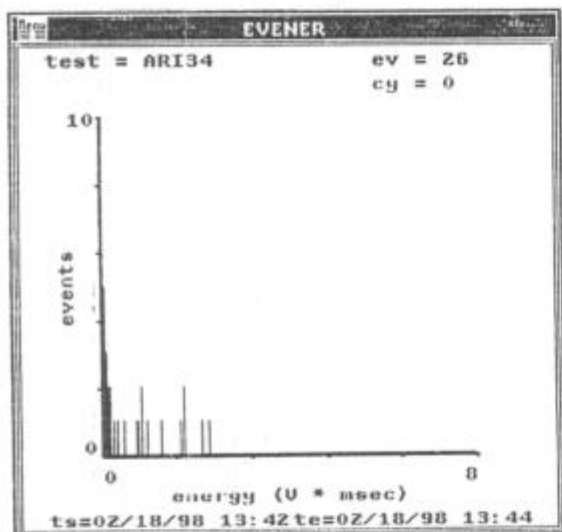


Fig. 52h Eventos en función de su energía

3.4.11- ENSAYO 35

Probeta: Uñazo

Presión de rotura: 6871 psi

Forma de la fractura: S

Eventos totales: 105

Eventos válidos: 66

Eventos digitalizados: 36

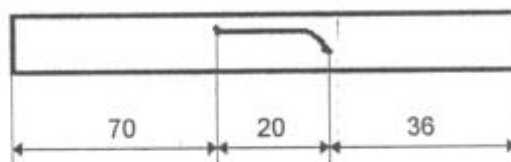


Fig. 53a Croquis de la probeta luego del ensayo

En las figuras 53a a 53h se presentan los distintos gráficos entregados por el equipo AEDOS que sirven para caracterizar cada uno de los ensayos.

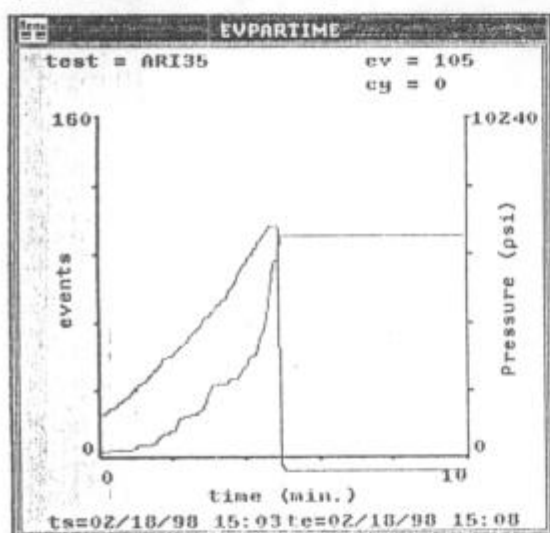


Fig. 53b. Cantidad total de eventos y presión en función del tiempo

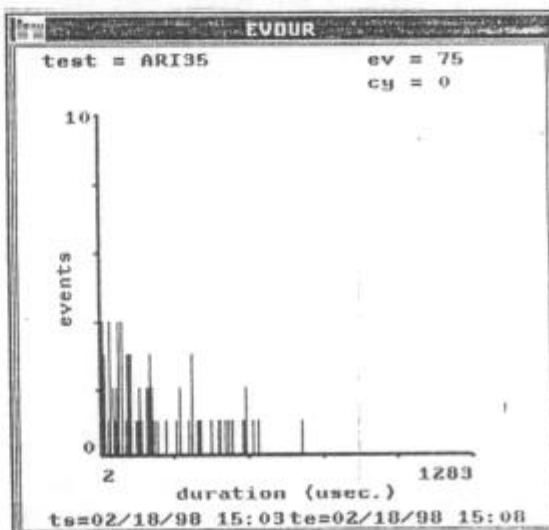


Fig. 53c. Eventos en función de su duración

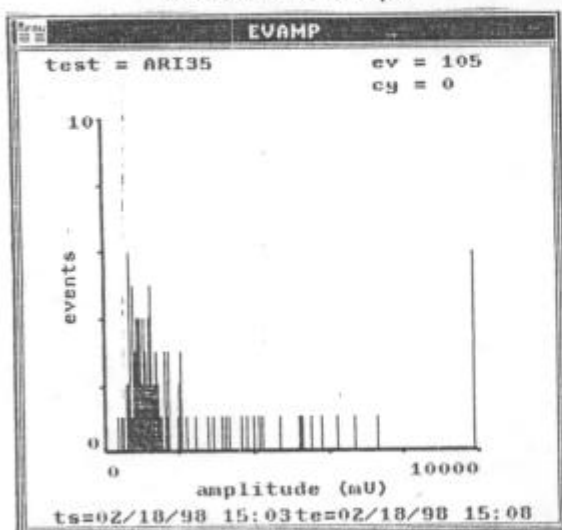


Fig. 53d. Eventos en función de la amplitud

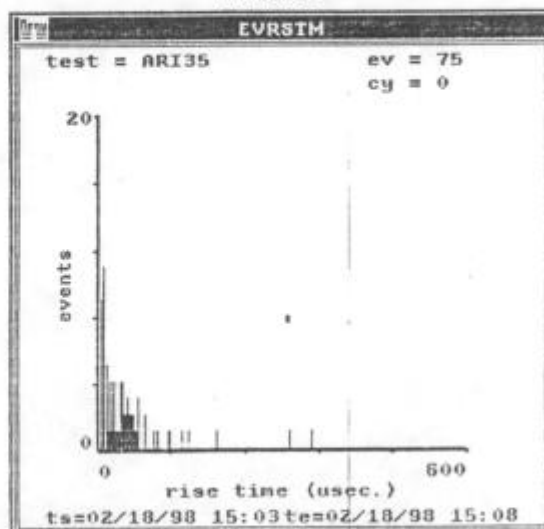


Fig. 53e. Eventos en función del rise time

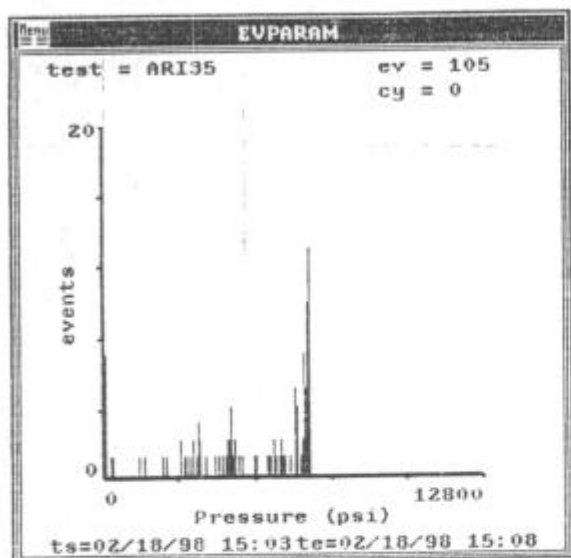


Fig. 53f. Eventos en función de la presión

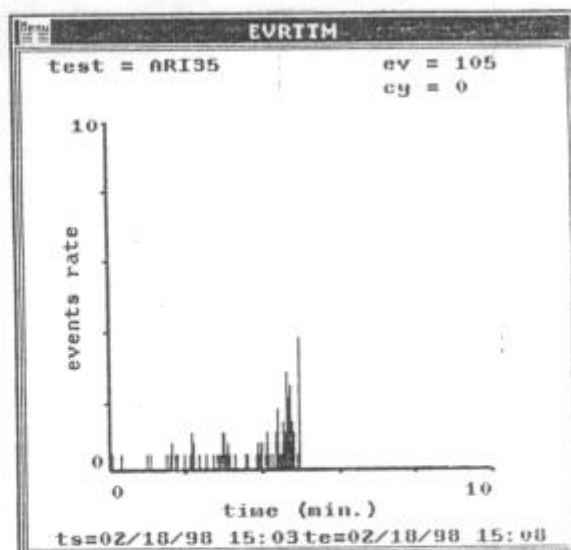


Fig. 53g. Tasa de eventos en función del tiempo

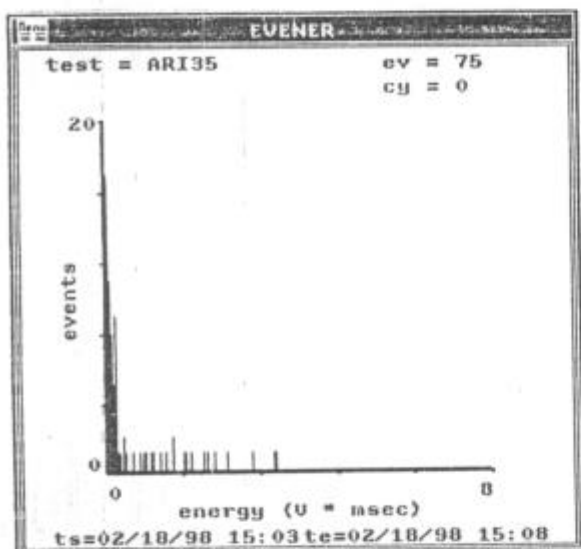


Fig. 53h Eventos en función de su energía

3.4.12- ENSAYO 36

Probeta: Con ovalidad

Presión de rotura: 7545 psi

Forma de la fractura: S

Eventos totales: 42

Eventos válidos: 18

Eventos digitalizados: 19

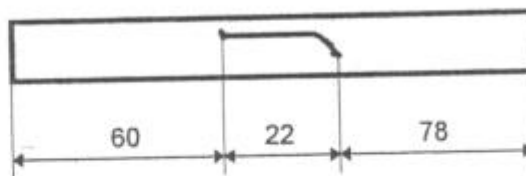


Fig. 54a Croquis de la probeta luego del ensayo

En las figuras 54b a 54h se presentan los distintos gráficos entregados por el equipo AEDOS que sirven para caracterizar cada uno de los ensayos.

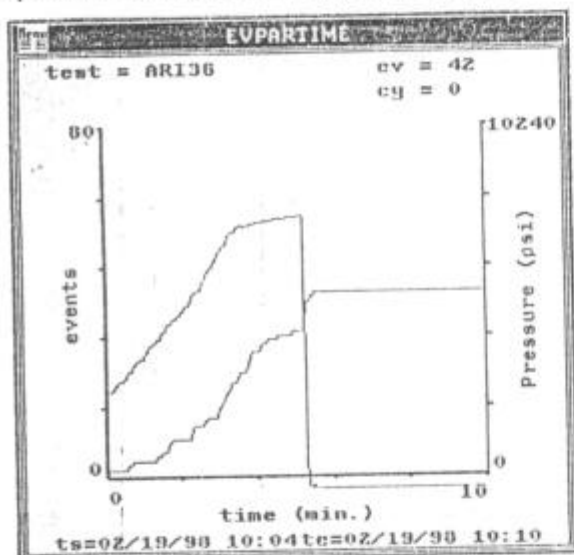


Fig. 54b. Cantidad total de eventos y presión en función del tiempo

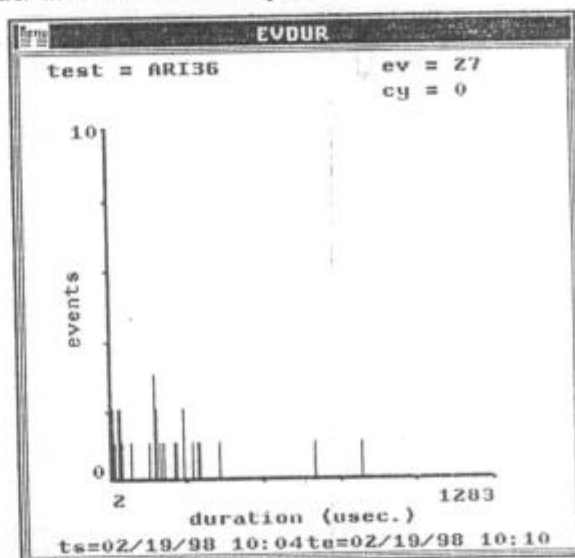


Fig. 54c. Eventos en función de su duración

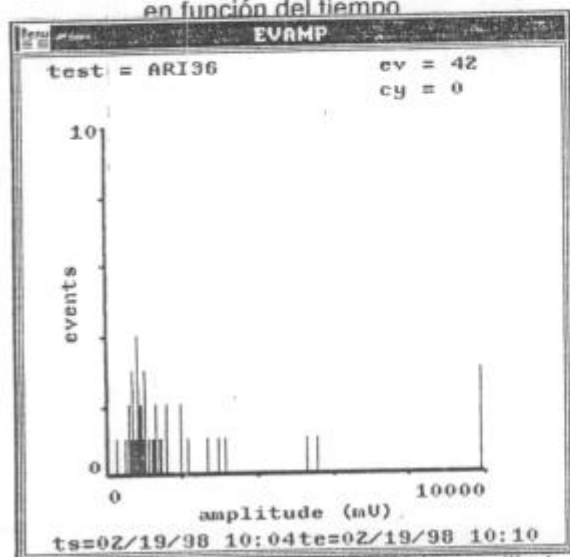


Fig. 54d. Eventos en función de la amplitud

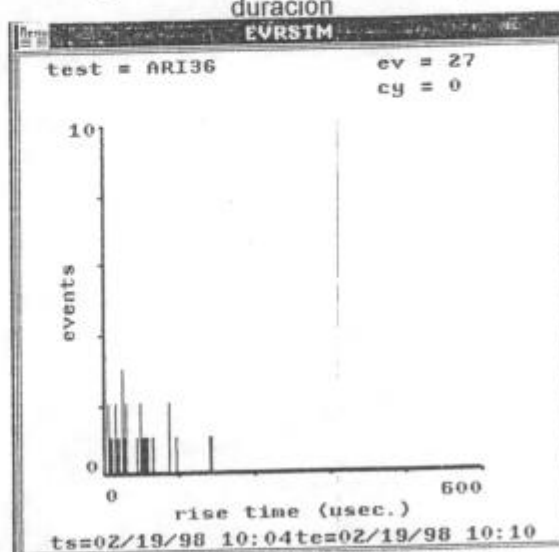


Fig. 54e. Eventos en función del rise time

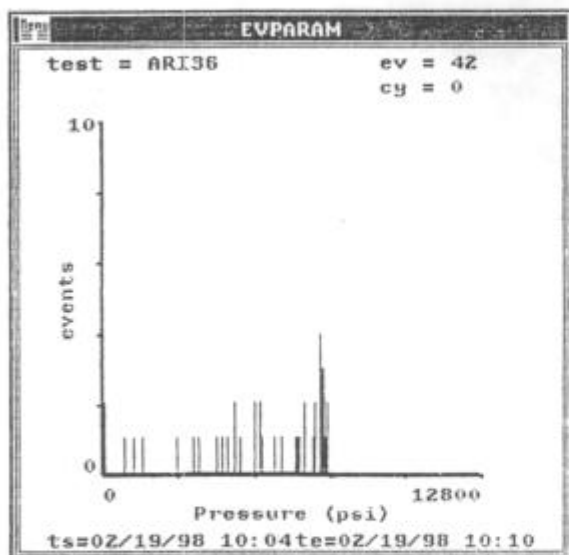


Fig. 54f. Eventos en función de la presión

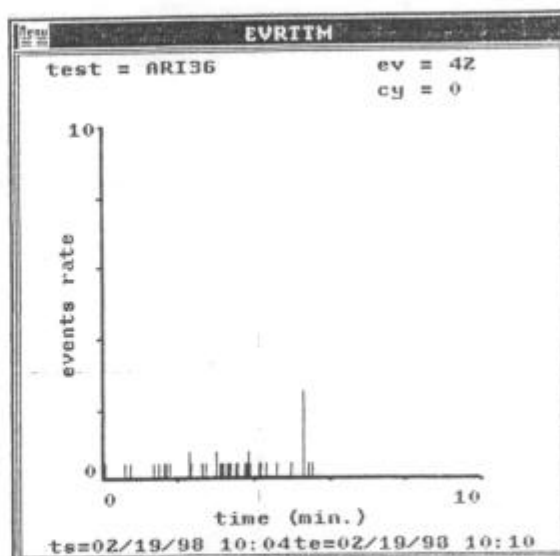


Fig. 54g. Tasa de eventos en función del tiempo

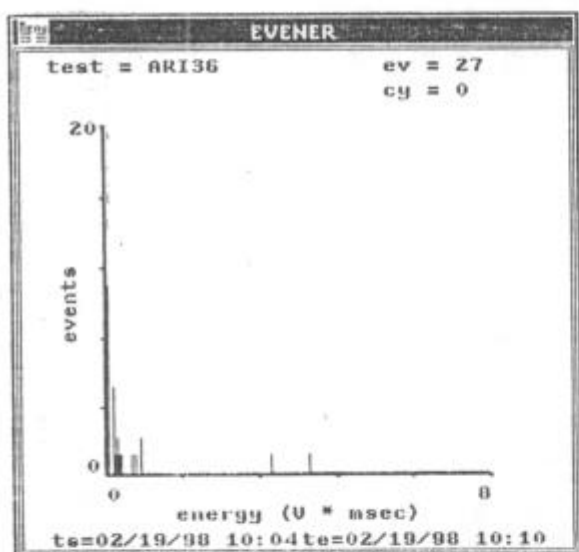


Fig. 54h Eventos en función de su energía

4- DISCUSION

Los datos obtenidos en los ensayos efectuados, han sido presentados en el Capítulo III. El objetivo de este capítulo es procesar y analizar los mismos, para poder extraer conclusiones. Se hará un análisis de los distintos parámetros de los eventos obtenidos en los ensayos 23, 24, 25, 27, 28, 29, 30, 31, 33, 34, 35 y 36. También se analizará el tipo de fractura obtenido.

4.1- CARACTERIZACION DE LA FRACTURA

Al someter la vaina a una presión interna creciente, se produce un adelgazamiento de la pared hasta que ésta no resiste y se produce la rotura por colapso plástico. En todas las vainas ensayadas, la fractura fué dúctil (ver sección 3.3). En el caso de la fractura dúctil que nos ocupa, la falla sobreviene como consecuencia de la nucleación de microcavidades, formadas en inclusiones o precipitados de segunda fase, durante el proceso de acumulación de deformación, y está determinada por el nivel y naturaleza del estado de tensiones efectivo que se desarrolla [9].

En todas las vainas ensayadas la fractura se desarrolla apreciablemente en la dirección axial, en la concavidad del tubo ya distorsionado. Según la bibliografía [9], también puede ocurrir otro tipo de falla: la dúctil localizada, que consiste en una perforación en zonas próximas a la generatriz de mayor concavidad. Este tipo de falla no se observó en ninguno de los 36 ensayos efectuados.

La fractura se presenta extendida en la dirección longitudinal, sobre la generatriz de máxima concavidad del tubo, distorsionado por efecto de la deformación inhomogénea. La superficie de fractura hace un ángulo de 45° con la superficie del tubo [9]. En las vainas con defectos no se observa una relación obvia de su comienzo con los defectos indicados. En estas vainas ensayadas, la fractura nunca se produjo donde estaban los defectos. Como el material es dúctil, presenta una gran tolerancia a estos defectos superficiales. Para que se hiciera sentir su influencia, la profundidad de los defectos debería ser de al menos $1/5$ del espesor de la pared [26]. Para acentuar la influencia de un uñazo, en el ensayo 12 se hizo una marca de $5\text{ }\mu\text{m}$ de profundidad, y a pesar de esto la vaina no rompió por esta marca.

Por las tensiones circunferenciales presentes, se desarrolla una fractura tipo I, la que se va propagando en la dirección axial, al llegar a una cierta extensión y al irse abriendo la pared del tubo, se produce en los dos extremos de la fractura un desgarro en la dirección circunferencial (fractura tipo II). Según el sentido en que se produzca el desgarro tendremos una fractura tipo "S" ó "C".

4.2- CARACTERIZACION DE LAS VAINAS POR EA.

4.2.1-POR LA PRESION DE ROTURA

Independientemente de los defectos, todas las vainas rompieron a presiones parecidas. A continuación se detallan los valores extremos y medio, junto con otros datos, para todos los ensayos:

Presión máxima de rotura: 7950psi Vainas 30 y 31 (sin defectos)

Presión mínima de rotura: 6736psi Vaina 24 (impronta)

Presión media de rotura: 7581psi

Desviación Estándar: 412 psi

Error relativo porcentual: 5,43%

La poca dispersión en los valores de presión de rotura estaría indicando que el efecto concentrador de tensiones producido por los defectos, no alcanza para disminuir estos valores. A continuación se calcularán los mismos considerando por un lado sólo las vainas sin defectos y por el otro las vainas con defectos.

VAINAS SIN DEFECTOS

Presión máxima de rotura: 7949psi

Presión mínima de rotura: 7814psi

Presión media de rotura: 7865psi

Desviación estándar: 66psi

Error relativo porcentual: 0,84%

VAINAS CON DEFECTOS

Presión máxima de rotura: 7814psi

Presión mínima de rotura: 6736psi

Presión media de rotura: 7297psi

Desviación estándar: 421psi

Error relativo porcentual: 5,77%

Se observa que las vainas sin defectos presentan una dispersión muy baja. Los valores de la presión para las vainas con defectos, por el contrario, presentan una mayor dispersión. Las vainas con defectos tienen una presión media de rotura un 9% inferior a la de las vainas sin defectos, que parece ser una diferencia significativa. Para comprobar si mediante la presión de rotura es posible distinguir entre las vainas sin defectos y las defectuosas realizamos un análisis ANOVA (test de Varianza), que permite determinar si dos lotes corresponden o no a la misma muestra de población. Se plantean las siguientes hipótesis:

Hipótesis a ser probada (hipótesis nula): $H_0: \mu = \mu_0$

Hipótesis alternativa: $H_1: \mu \neq \mu_0$

En nuestro caso μ sería la media de la presión de rotura en las vainas defectuosas y μ_0 la media de la distribución correspondiente a las vainas sin defecto.

Se tomó un nivel de significación del 5%.

Haciendo este análisis se observó que la hipótesis nula es rechazada, es decir el lote de vainas defectuosas y sin defectos pertenecen a distintas poblaciones.

4.2.2-POR EL NUMERO DE EVENTOS

En principio (ver sección 3.4), parecería que no es posible con los ensayos realizados hacer una vinculación entre el número de eventos presentes y la presencia o ausencia de defectos. Hay vainas sin defectos con pocos eventos y otras con muchos. Igual situación se presenta en las vainas con defectos. Se ensayaron dos vainas con improntas. Una presenta pocos eventos (vaina 27, 32 eventos) y la otra presenta una cantidad mucho mayor (vaina 24, 181 eventos).

Pero del análisis de los valores medios del número de eventos se pueden extraer ciertas conclusiones.

VAINAS SIN DEFECTOS

Valor medio del número de eventos por ensayo: 154 eventos

VAINAS CON DEFECTOS

Valor medio del número de eventos por ensayo: 105 eventos

Es decir, hay una diferencia de aproximadamente 47% entre los valores medios, lo que en principio podría indicar que mediante la EA se podría distinguir entre las vainas sin defectos y las defectuosas. Entonces, para comprobar si el lote de vainas sin defectos y el lote de las vainas con defectos corresponden o no a la misma muestra de población, que es lo que parece, se realizó un análisis ANOVA (test de Varianza). Es decir se plantean las

siguientes hipótesis:

Hipótesis a ser probada (hipótesis nula): $H_0: \mu = \mu_0$

Hipótesis alternativa: $H_1: \mu \neq \mu_0$

En nuestro caso μ sería la media de la distribución de eventos en las vainas defectuosas y μ_0 la media de la distribución correspondiente a las vainas sin defecto.

Se tomó un nivel de significación del 5%.

Haciendo este análisis se observó que la hipótesis nula es aceptada, es decir el lote de vainas defectuosas y sin defectos pertenecen a la misma población.

4.2.3- POR LA RELACION EVENTOS - PRESION

De las figuras b y f correspondientes a todos los ensayos se ve que hay un pico de eventos en el intervalo [90% 100% presión de rotura]. En este rango de presiones, es donde se produce la mayor parte de la deformación de la vaina y su fractura. Es lógico que en esta parte del ensayo tengamos la activación de la mayor parte de las fuentes potenciales de EA.

De las figuras f correspondientes a cada ensayo se ve que menos del 50% de los eventos se producen por debajo de 6200 psi (82% presión media de rotura)

En todas las vainas con defectos, excepto la que presenta un desgarró, se observa una aparición más temprana de los eventos. No así en las vainas sin defectos y en la vaina con desgarró, en las que los eventos están más cerca de la presión de rotura. Aquí es bueno recordar (ver sección 3.2.2) que en el desgarró sólo se observa un cambio en el color de la superficie, a diferencia de los otros defectos en los que se ve un daño en la superficie de la vaina. Teniendo en cuenta las características especiales del desgarró, se puede decir que en las vainas defectuosas comienzan a producirse eventos a presiones inferiores a las de inicio de la emisión para las vainas sin defectos. Esto podría indicar que los defectos actúan como concentradores de tensiones, disminuyendo los valores mínimos de presión para producir EA.

4.2.4- POSIBLES FUENTES DE EA

Las siguientes son fuentes potenciales de EA (ver Sección 1.2):

- Movimiento de dislocaciones.
- Maclas de deformación.
- Fractura y decohesión de inclusiones.
- Fractura.

Se observa que los eventos de EA aparecen sobre todo, al final del ensayo. En este periodo se observa una gran deformación plástica al formarse la ampolla, y se produce la rotura final de la vaina. Debido a que el zircaloy-4 tiene una estructura hcp a temperatura ambiente, son pocos los planos de deslizamiento que presenta, por lo que no es de esperar mucha EA debida al movimiento de dislocaciones.

Después de las distintas etapas de fabricación (ver sección 1.6.3), las vainas sufren un recocido final, que proporciona una estructura recristalizada en sólo un 5%, presentando un tamaño de grano muy pequeño. Debido a este pequeño tamaño de grano, es muy poca la posibilidad de que la vaina pueda maclar (ver sección 1.2.2), por lo que descartamos la formación de maclas como una de las causas de EA [27].

Es evidente que la mayor parte de la EA se produce en la etapa final del ensayo, donde convergen tres fuentes potenciales de EA, la deformación plástica, la fractura y decohesión de precipitados y el inicio y propagación de una fisura. Sería conveniente realizar un análisis espectral de los eventos de esta etapa del ensayo a fin de ver si es posible encontrar diferencias entre los eventos que nos permitan identificarlos como originados por alguno de estos mecanismos. Como el equipo tiene un cierto tiempo de adquisición y validación de eventos, mientras está captando y procesando un evento no toma otro que se produzca, con lo que es seguro que se pierden muchos eventos que se producen en esta etapa. De todos modos la gran cantidad de eventos que se registran en esta parte del ensayo indica que la gran deformación plástica y la fractura son las fuentes principales de EA.

4.2.5- ANALISIS ESTADISTICO DE LOS PARAMETROS DE LOS EVENTOS

Para el ajuste de los distintos parámetros se utilizó el programa STATISTICA 4.5 para Windows. A partir de la página 95 se presentan para cada ensayo los histogramas correspondientes a la amplitud (fig.a), la duración (fig. b) y el rise time(fig.c) junto con la función de distribución que mejor ajusta los datos.

4.2.5.1- AMPLITUD

Se hicieron los histogramas para cada ensayo y se buscó cuál era la función de distribución que mejor los ajustaba. Se encontró que el mejor ajuste se hacía con una distribución lognormal. Esto concuerda con la bibliografía consultada [12] y con otros trabajos realizados en el grupo.

Observando los histogramas correspondientes a la amplitud, notablemente en los ensayos 23, 25, 27, 31 y 36, se observa que hay dos picos. Para hacer más evidente la existencia de estos dos picos en el histograma de amplitud, se calculó el logaritmo de la amplitud y se graficó el respectivo histograma. Esta es una manera de acentuar el segundo pico que siempre es menor que el primero. Para mostrar el efecto de aplicar el logaritmo, la figura 55 muestra las distribuciones del logaritmo de la amplitud

para los ensayos 27 y 33. En el ensayo 33 no es evidente a simple vista que haya dos picos en la distribución de A (ver ensayo 33, figura 66.a), pero al tomar el logaritmo de A si se pueden observar.

Los dos picos podrían corresponder a dos mecanismos diferentes de generación de EA (ya que podríamos decir que cada mecanismo produce eventos de distinta energía y por lo tanto de distinta amplitud). Uno que produciría eventos de poca energía (correspondientes a amplitudes pequeñas) y otro que produciría menos eventos pero de mayor energía. Los eventos de poca energía podrían ser producidos por la deformación plástica (ver sección 1.2.1), mientras que los de mayor energía podrían ser debidos a la decohesión y fractura de precipitados (ver sección 1.2.3) o a la propia propagación de la fisura (ver sección 1.2.4). Los valores extremos y el valor medio, para todos los ensayos son:

Máxima amplitud: 9851mv	Vaina 28 (facetado)
-------------------------	---------------------

Mínima amplitud: 688mv	Vaina 28 (facetado)
------------------------	---------------------

Amplitud media: 2527mv

4.2.5.2- DURACION

En el caso de la duración de los eventos, se ajustaron los datos con una distribución exponencial, pero los resultados fueron variados. En los ensayos 23, 29, 31 y 35, el ajuste fue aceptable, pero en los ensayos 27, 28, 33, 34 y 36 el ajuste fue malo. Los valores extremos y el valor medio, para todos los ensayos son:

Máxima duración: 3021 μ s	Vaina 23 (sin defectos)
-------------------------------	-------------------------

Mínima duración: 4 μ s	Vaina 33 (sin defectos)
----------------------------	-------------------------

Duración media: 268 μ s

4.2.5.3- RISE TIME

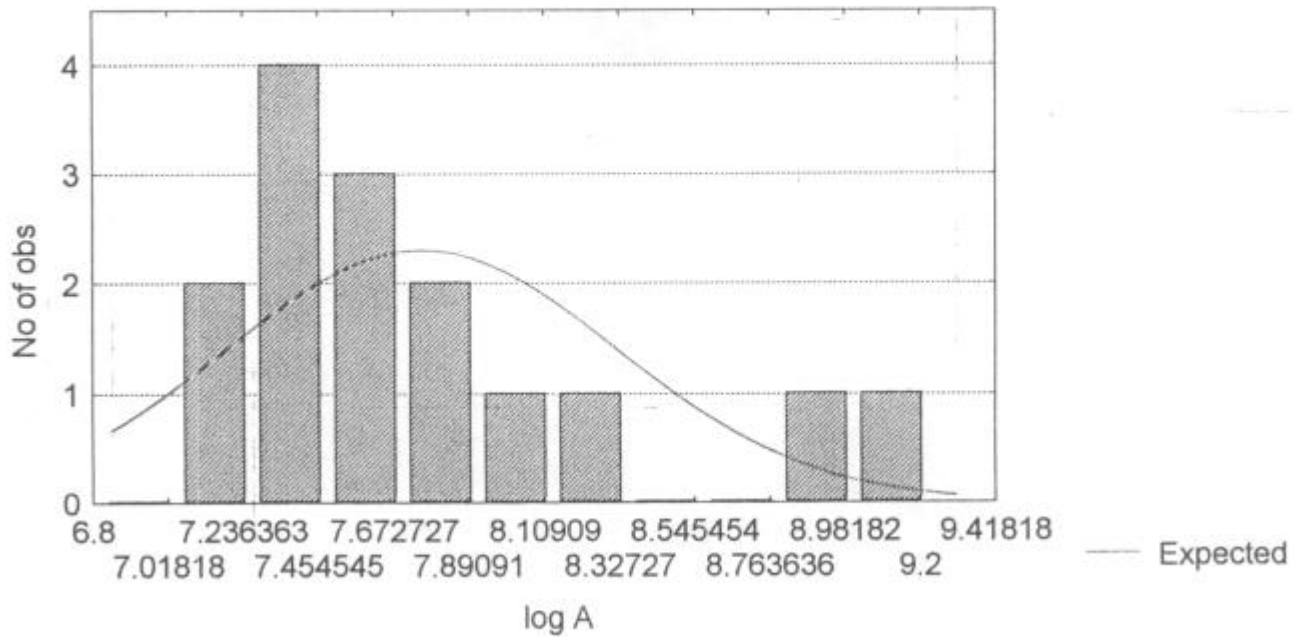
Los valores de rise time también se ajustaron con una distribución exponencial, al igual que con la duración, los resultados fueron variados. En los ensayos 24, 28, 31, y 35 el ajuste fue aceptable. En los ensayos 23, 29 y 36 el ajuste fué malo. Los valores extremos y el valor medio, para todos los ensayos son:

Máximo rise time: 1006 μ s	Vaina 25 (sin defecto)
--------------------------------	------------------------

Mínimo rise time: 3 μ s	Vainas 30, 31, 33 (sin defectos), 34 (desgarro), 36 (ovalidad), y 27 (impronta)
-----------------------------	--

Rise time medio: 55 μ s

Amplitud ARI27; distribution: Normal
 Kolmogorov-Smirnov $d = .1531226$, $p = \text{n.s.}$
 Chi-Square: -----, $df = 0$, $p = \text{---}$



Amplitud ARI33; distribution: Normal
 Kolmogorov-Smirnov $d = .1010322$, $p = \text{n.s.}$
 Chi-Square: 13.48882, $df = 5$, $p = .0192214$

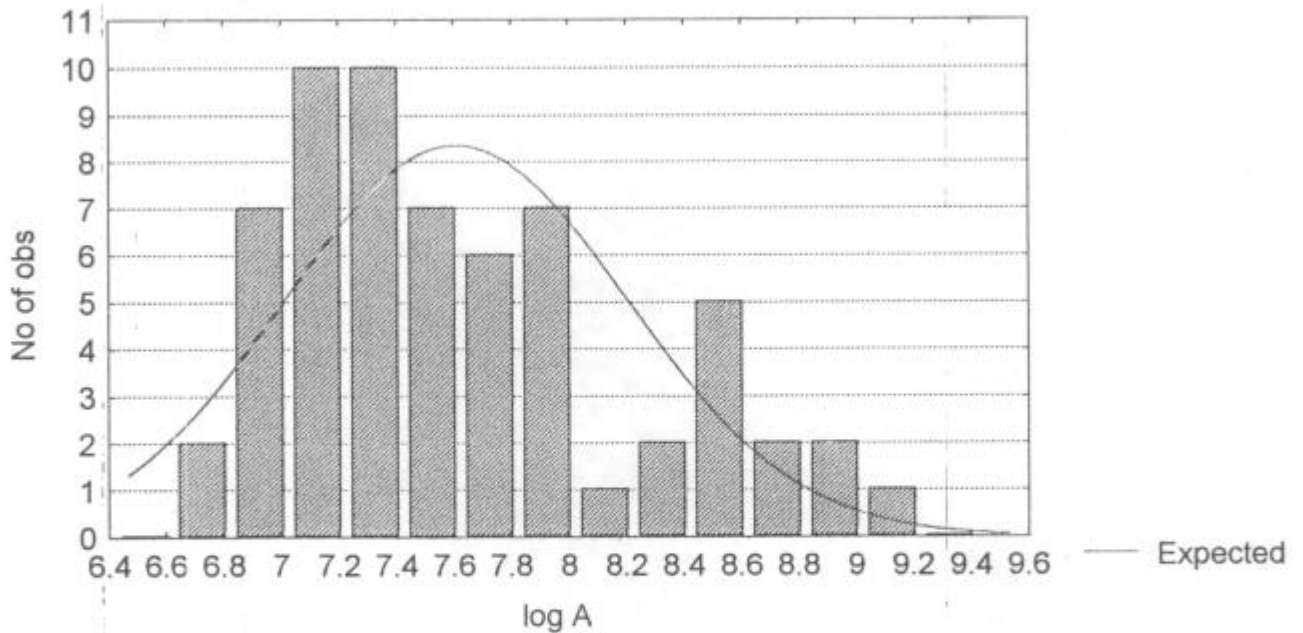


Fig. 55. Histogramas del logaritmo de la amplitud para dos ensayos

4.2.5.4- VALORES MEDIOS

En la tabla VI se presentan los valores medios de los 3 parámetros correspondientes a cada uno de los ensayos.

TABLA VI
VALORES MEDIOS DE LOS PARAMETROS

ENSAYO	DEFECTO	AMPLITUD (mv)	DURACION (μ s)	RISE TIME (μ s)
23	-	2078	283	36
24	IMPRONTA	2167	213	46
25	-	2740	274	56
27	IMPRONTA	2785	259	46
28	FACETADO	2505	281	58
29	-	2689	297	51
30	-	2797	304	59
31	-	2666	302	64
33	-	2436	237	56
34	DESGARRO	2575	293	67
35	UÑAZO	2315	226	47
36	OVALIDAD	2125	263	55

Del análisis de esta tabla se puede ver que los valores medios de los distintos parámetros no tienen mucha dispersión. Esto podría atribuirse a que las condiciones en los distintos ensayos son las mismas y actúan los mismos mecanismos de producción de EA. Además esto estaría indicando que los defectos que presentan las vainas no tendrían gran influencia sobre la EA.

Para poder ver de una forma más cómoda si por los valores medios de A, D y R podemos distinguir entre vainas con defectos y vainas sin ellos, se hizo un gráfico tridimensional de A, D y R. Como se observa en la figura 56, los puntos correspondientes a vainas sin defectos y vainas con ellos están mezclados, no se observa que se separen en distintos grupos. Lo que si se aprecia es que los puntos correspondientes a las vainas sin defectos se ubican, en general, en valores mayores de A y D. Para investigar más en profundidad esta observación, se tomaron los valores extremos (máximos y mínimos), los valores medios y la desviación estandar de A, D y R para los dos grupos de vainas y se los representó, (ver fig. 57) observandose que tanto la amplitud como la duración media de los eventos en las vainas sin defectos son mayores que en las vainas defectuosas. Entonces se realizó un análisis ANOVA para A y para D. El análisis para A indicó que la hipótesis nula debe ser aceptada, es decir no se puede distinguir entre vainas defectuosas y sin defectos en base a la amplitud de los eventos, pero el mismo análisis en el caso de D indicó que la hipótesis nula debe ser rechazada, es decir de acuerdo a los ensayos analizados, es posible distinguir entre las vainas sin

DISTRIBUCION DE A, D y RT

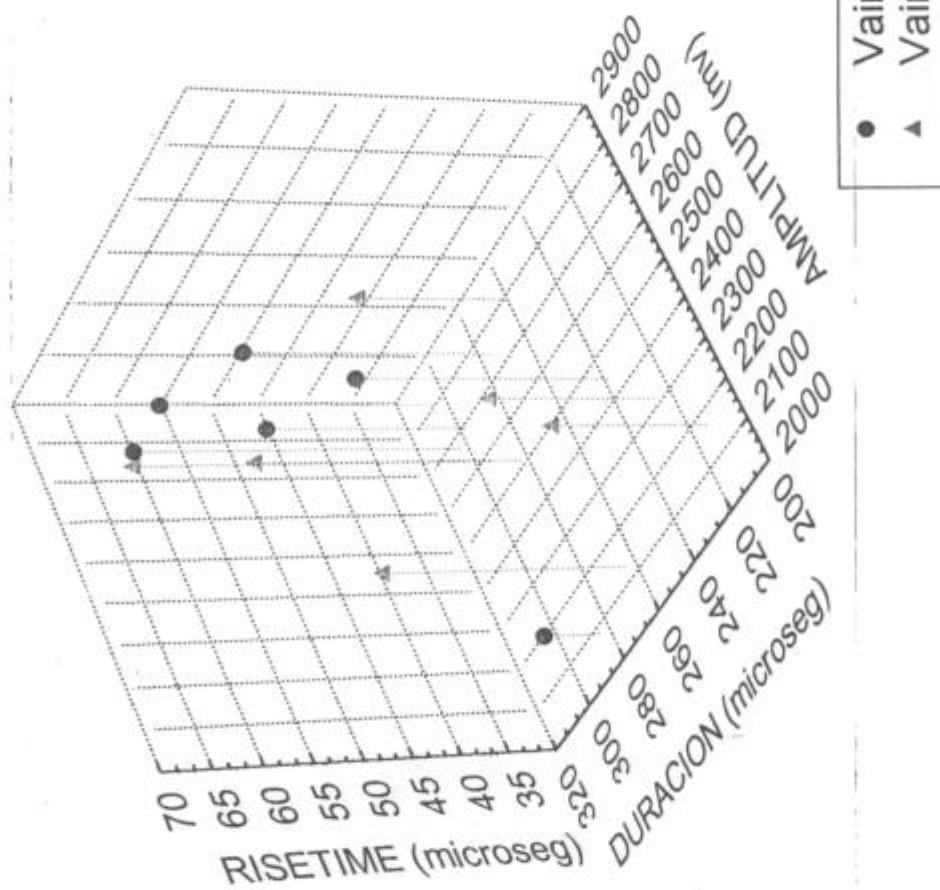


Fig. 56. Distribución de Amplitud, Duración y Rise Time para ambos tipos de vainas

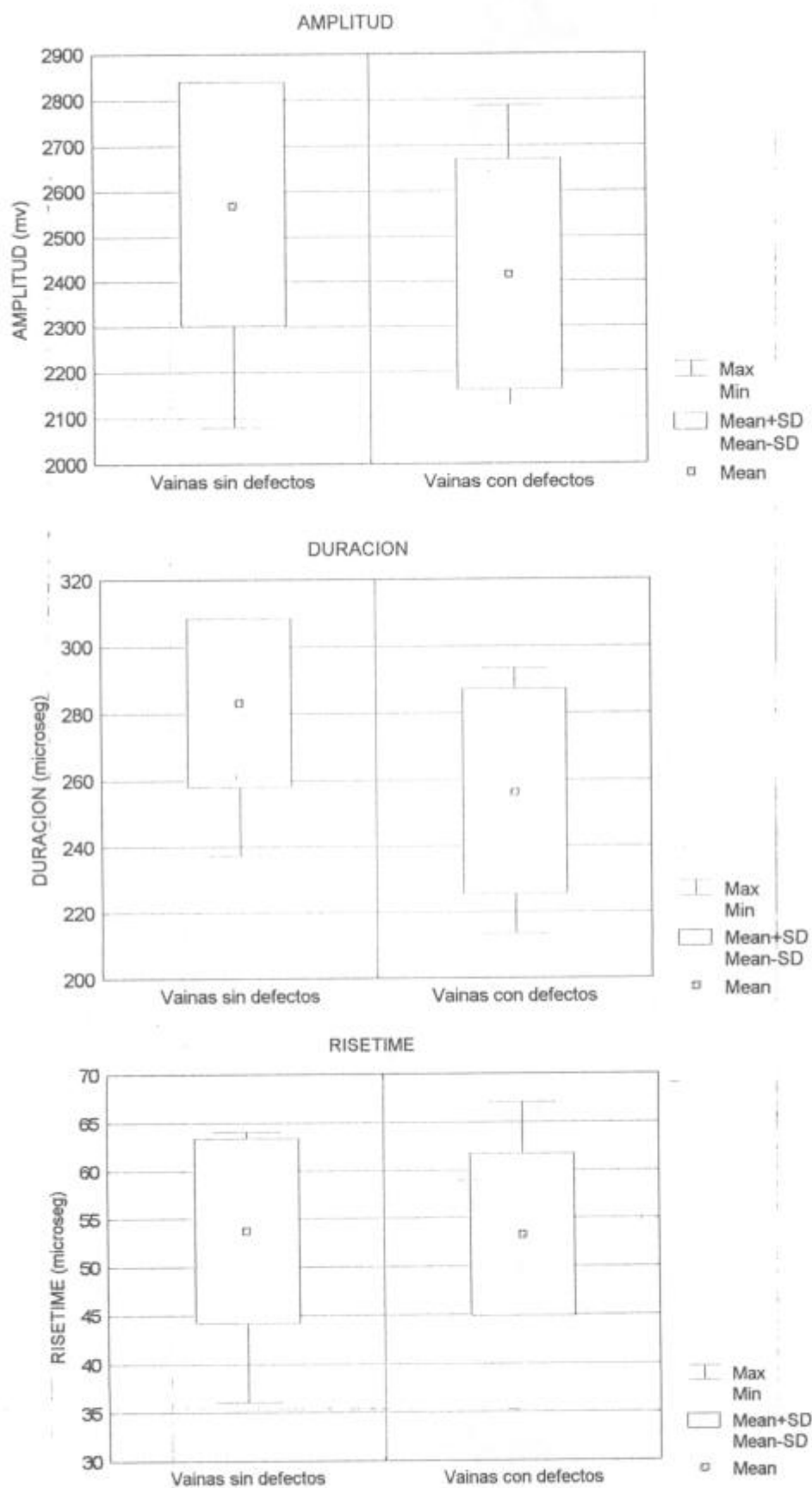


Fig. 57. Comparación entre A, D y RT para ambos tipos de vainas

defectos y las defectuosas, tomando la duración de los eventos.

Por último se realizó un análisis de clusters, es decir se toman los datos de A, R y RT y en vez de representarlos juntos en un gráfico tridimensional (ver fig. 56) se los representan de a pares y se observa si las distintas clases de datos quedan en regiones separadas. Entonces en la fig. 58 se representaron los valores de A-D (a), RT-D (b) y RT-A (c). En b) se observa que los puntos correspondientes a las vainas sin defectos y a las defectuosas (salvo un par de puntos) quedarían a ambos lados de una frontera que se insinúa entre las dos regiones y que se extendería aproximadamente según una paralela a la diagonal del gráfico. En c) también podría existir una frontera que separase ambas regiones.

Entonces, concluimos en que sería posible a través de la duración media de los eventos distinguir las vainas sin defectos de las que los tienen. Es necesario ampliar el número de ensayos para dar a todo este análisis una mayor solidez estadística.

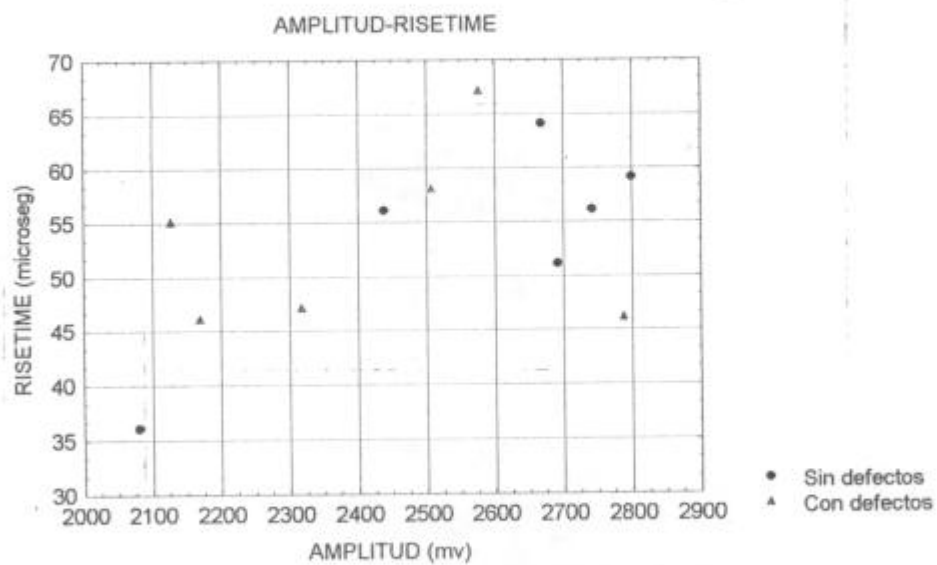
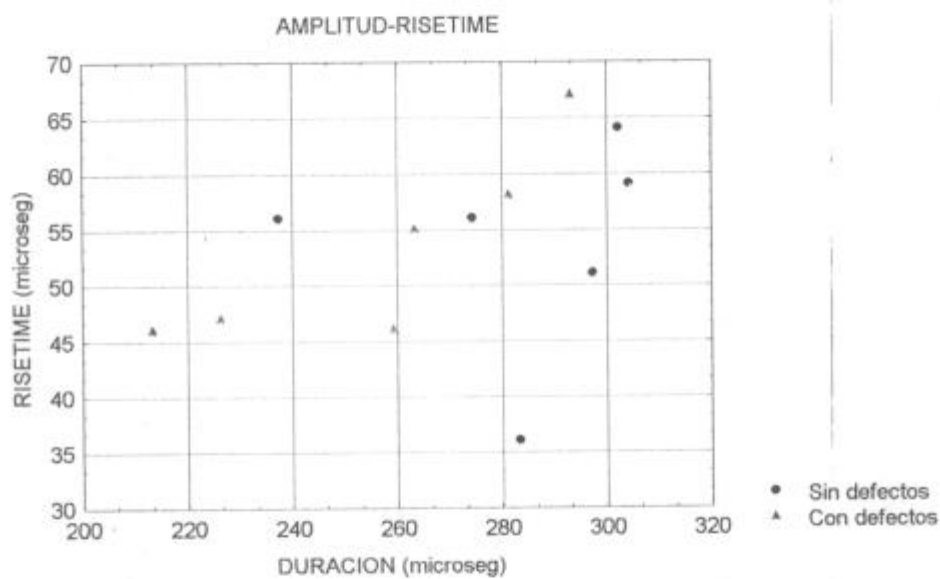
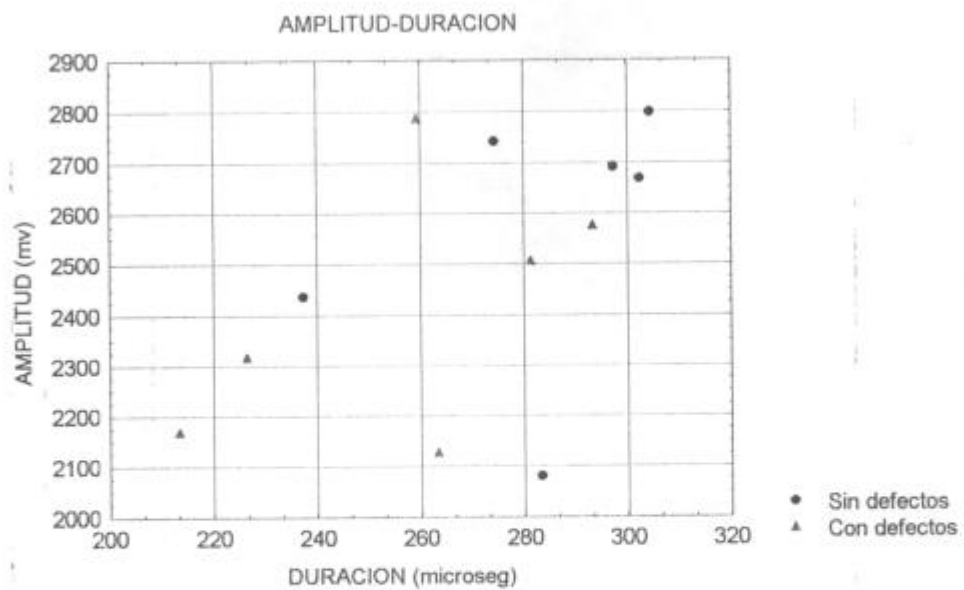


Fig. 58. Análisis de clusters para A, D y RT

Fig.1 Amplitud ARI23 ; distribución: Lognormal
Kolmogorov-Smirnov $d = .0625153$, $p = n.s.$
Chi-Square: ———, $df = 0$, $p = —$

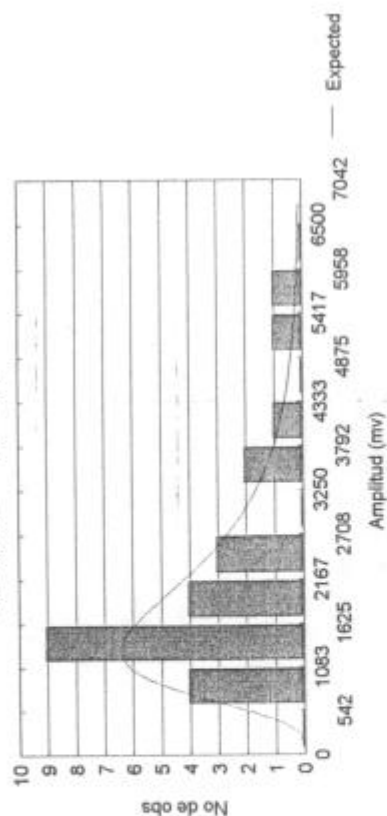


Fig. 2 Duración ARI23 ; distribución: Exponencial
Kolmogorov-Smirnov $d = .1925342$, $p = n.s.$
Chi-Square: 5.527064, $df = 1$, $p = .0187305$

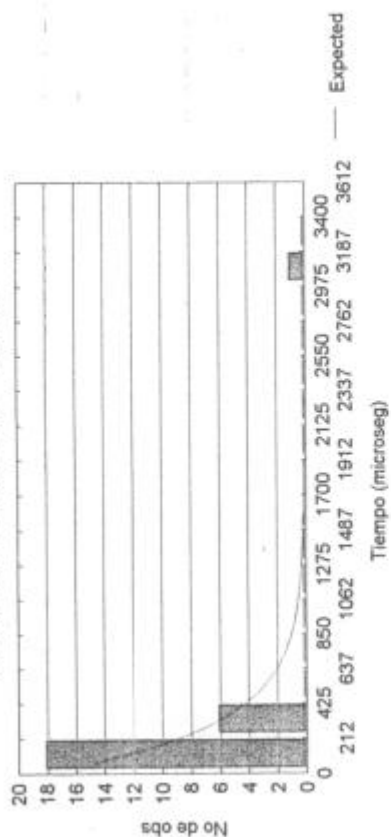
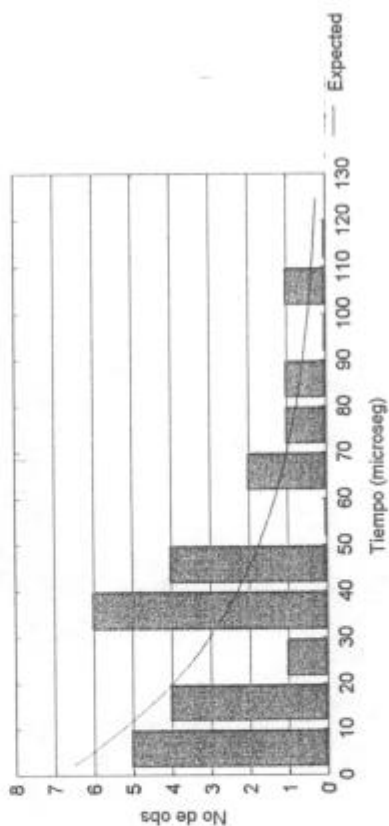


Fig. 3 Risettime ARI23 ; distribución: Exponencial
Kolmogorov-Smirnov $d = .1658045$, $p = n.s.$
Chi-Square: 2.942767, $df = 1$, $p = .0862726$



ARI 23 EVENTOS VALIDOS

Fig. 59. Ajuste de distribuciones para A, D y RT. Ensayo 23

Fig. 1 Amplitud ARI24 ; distribución: Lognormal
Kolmogorov-Smirnov $d = .1479840$, $p < .05$
Chi-Square: 26.61404 , $df = 4$, $p = .0000239$

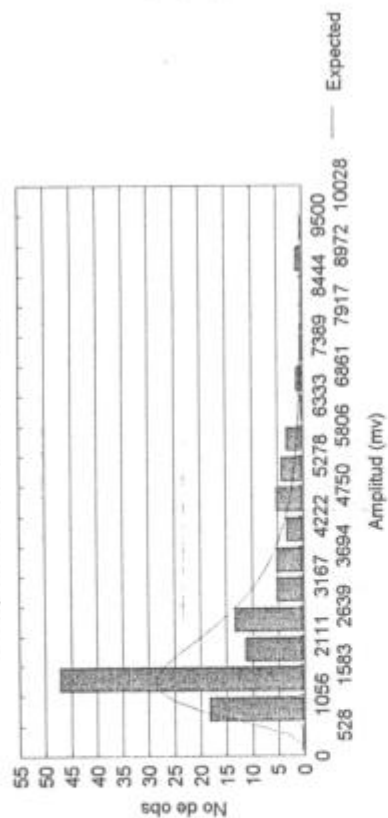


Fig. 3 Risetime ARI24 ; distribución: Exponencial
Kolmogorov-Smirnov $d = .0567678$, $p = n.s.$
Chi-Square: 18.17118 , $df = 5$, $p = .0027444$

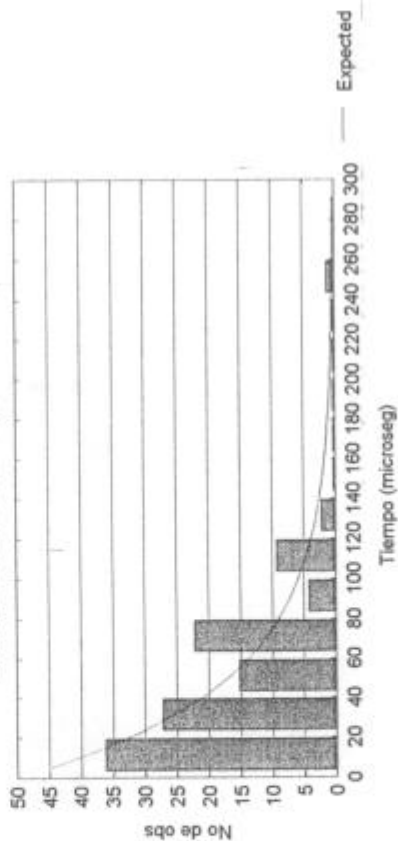
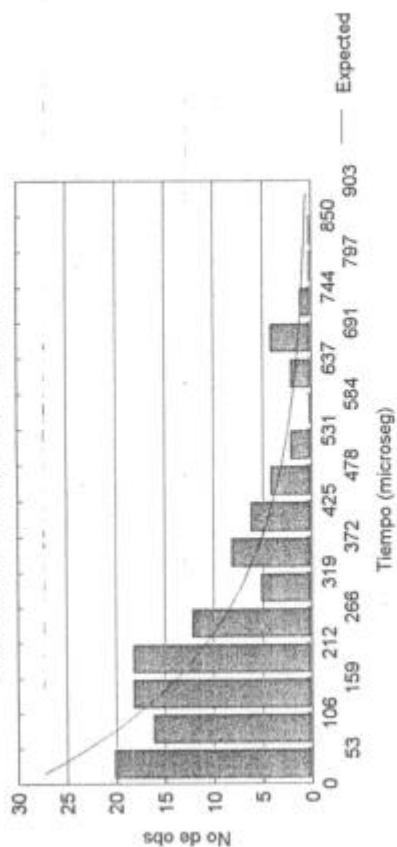


Fig.2 Duración ARI24 ; distribución: Exponencial
Kolmogorov-Smirnov $d = .0895103$, $p = n.s.$
Chi-Square: 9.376538 , $df = 8$, $p = .3115728$



ARI 24 EVENTOS VALIDOS

Fig. 60. Ajuste de distribuciones para A, D y RT. Ensayo 24

Fig. 1 Amplitud ARI25; distribución: Lognormal
Kolmogorov-Smirnov $d = .0812827$, $p = n.s.$
Chi-Square: 5.006945, $df = 2$, $p = .0818165$

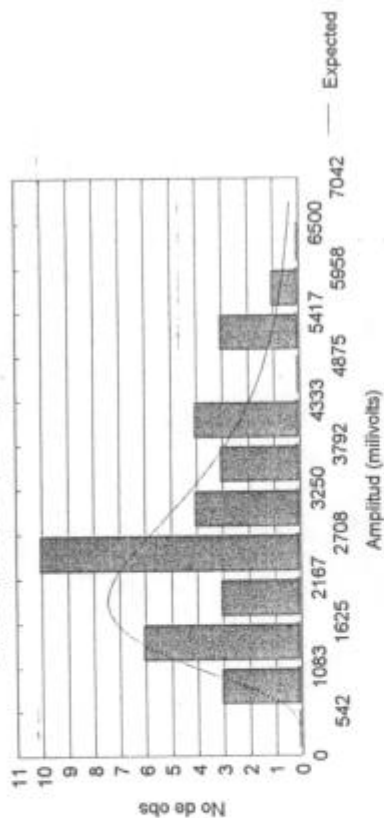
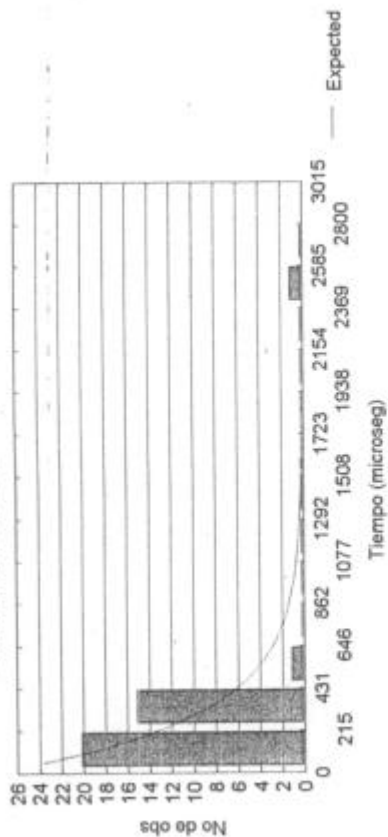


Fig. 3 RisetimeARI25; distribución: Exponencial
Kolmogorov-Smirnov $d = .1418058$, $p = n.s.$
Chi-Square: ---, $df = 0$, $p = ---$



Fig. 2 Duracion ARI25; distribución: Exponencial
Kolmogorov-Smirnov $d = .1542458$, $p = n.s.$
Chi-Square: 7.917620, $df = 1$, $p = .0048985$



ARI 25 EVENTOS VALIDOS

Fig. 61. Ajuste de distribuciones para A, D y RT. Ensayo 25

Fig. 1 Amplitud ARI27; distribución: Lognormal
Kolmogorov-Smirnov $d = .1285173$, $p = n.s.$
Chi-Square: —, $df = 0$, $p = ---$

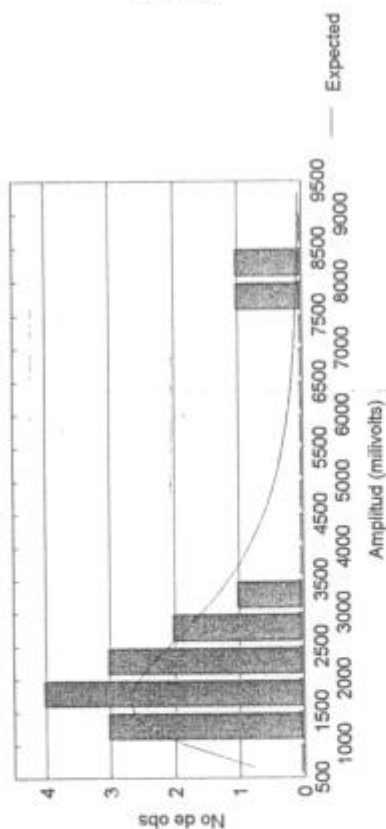


Fig. 2 Duracion ARI27; distribución: Exponencial
Kolmogorov-Smirnov $d = .0899173$, $p = n.s.$
Chi-Square: —, $df = 0$, $p = ---$

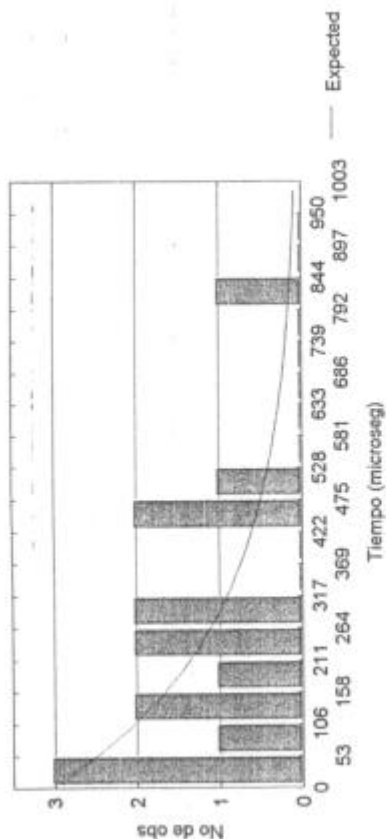
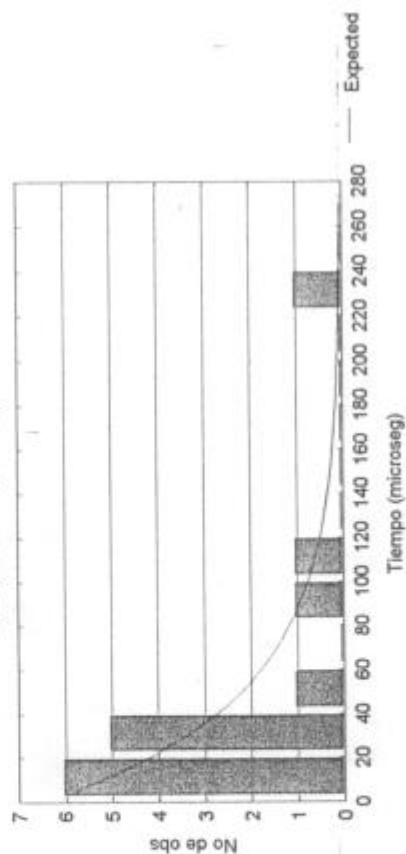


Fig. 3 Risetime ARI27; distribución: Exponencial
Kolmogorov-Smirnov $d = .1528949$, $p = n.s.$
Chi-Square: —, $df = 0$, $p = ---$



ARI 27 EVENTOS VALIDOS

Fig. 62. Ajuste de distribuciones para A, D y RT. Ensayo 27

Fig. 1 Amplitud ARI28; distribución: Lognormal
Kolmogorov-Smirnov $d = .0882528$, $p < .20$
Chi-Square: 15.62439, $df = 3$, $p = .0013561$

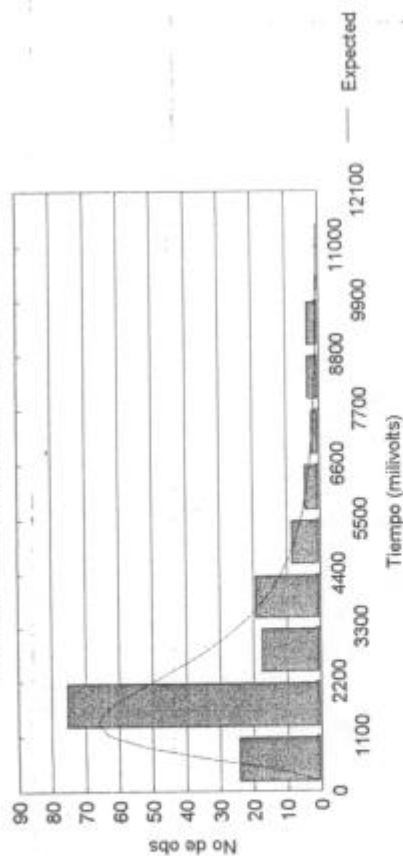


Fig. 3 Rise time ARI28; distribución: Exponencial
Kolmogorov-Smirnov $d = .0435024$, $p = n.s.$
Chi-Square: 8.305160, $df = 2$, $p = .0157323$

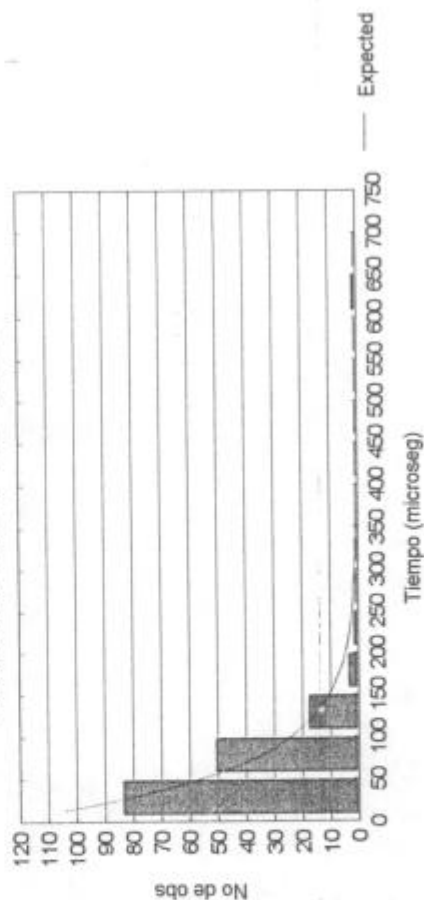
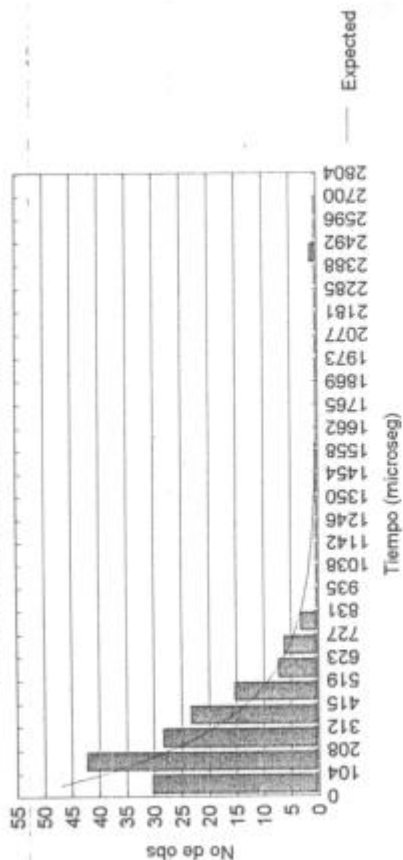


Fig. 2 Duración ARI28; distribución: Exponencial
Kolmogorov-Smirnov $d = .1148161$, $p < .05$
Chi-Square: 20.51633, $df = 7$, $p = .0045649$



ARI 28 EVENTOS VALIDOS

Fig. 63. Ajuste de distribuciones para A, D y RT. Ensayo 28

Fig. 1 Amplitud ARI29; distribución: Lognormal
Kolmogorov-Smirnov $d = .1072808$, $p < .10$
Chi-Square: 23.96884, $df = 7$, $p = .0011571$

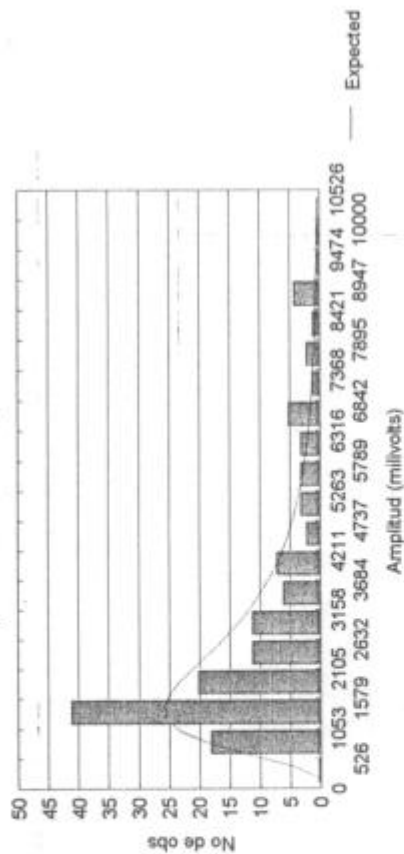


Fig. 3 Rise time ARI29; distribución: Exponencial
Kolmogorov-Smirnov $d = .0941454$, $p < .20$
Chi-Square: 35.00704, $df = 11$, $p = .0002485$

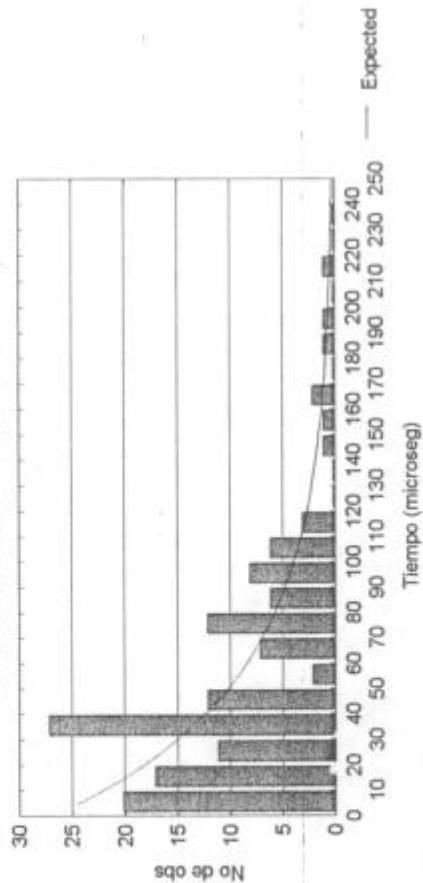
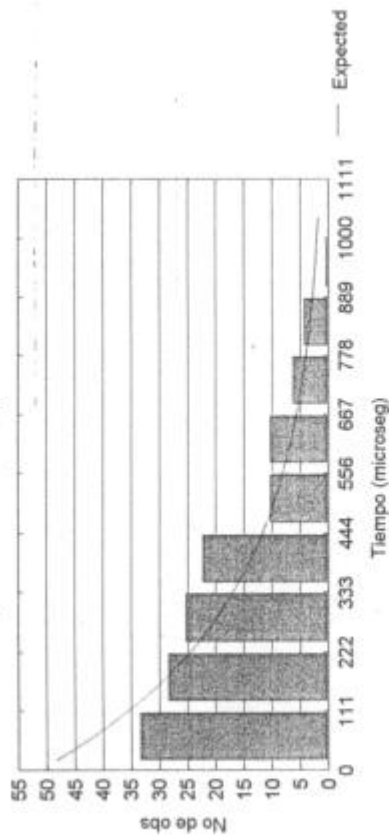


Fig. 2 Duración ARI29; distribución: Exponencial
Kolmogorov-Smirnov $d = .0840864$, $p = n.s.$
Chi-Square: 17.32469, $df = 6$, $p = .0081729$



ARI 29 EVENTOS VALIDOS

Fig. 64. Ajuste de distribuciones para A, D y RT. Ensayo 29

Fig. 1 Amplitud ARI30; distribución: Lognormal
Kolmogorov-Smirnov $d = .0528633$, $p = n.s.$
Chi-Square: 7.833319, $df = 3$, $p = .0496037$

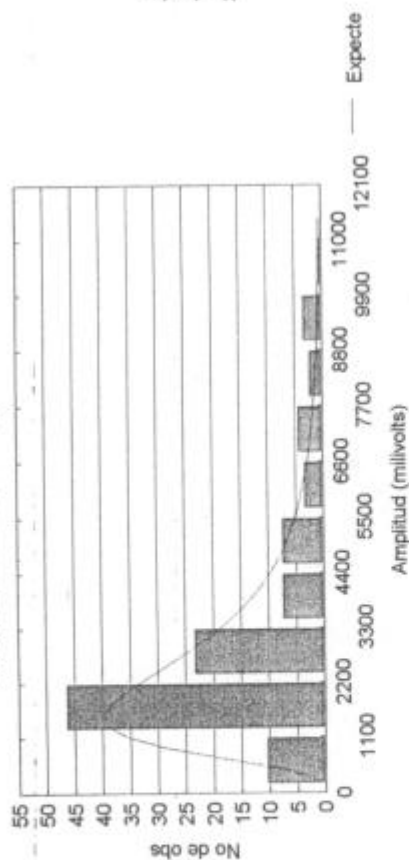


Fig. 3 Risetime ARI30; distribución: Exponencial
Kolmogorov-Smirnov $d = .0814117$, $p = n.s.$
Chi-Square: 16.03239, $df = 2$, $p = .0003307$

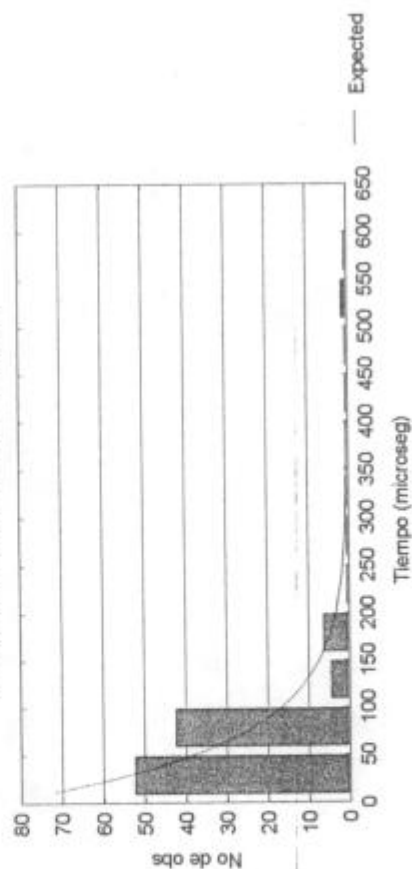
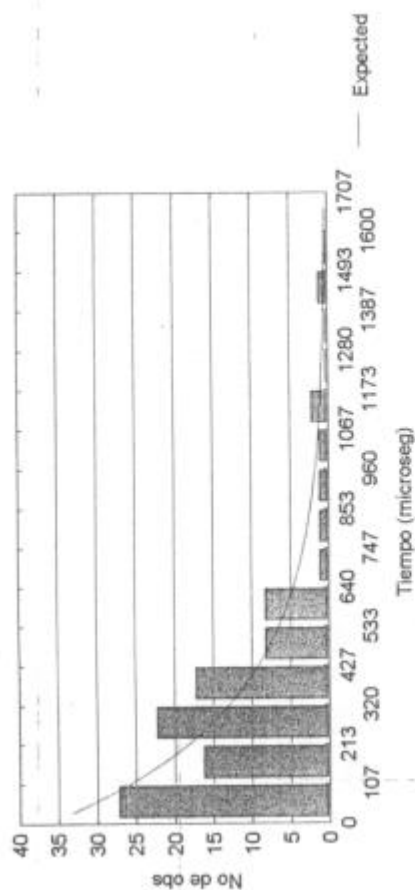


Fig. 2 Duracion ARI30; distribución: Exponencial
Kolmogorov-Smirnov $d = .0945903$, $p = n.s.$
Chi-Square: 13.08221, $df = 6$, $p = .0417775$



ARI 30 EVENTOS VALIDOS

Fig. 65. Ajuste de distribuciones para A, D y RT. Ensayo 30

Fig. 1 Amplitud ARI31 ; distribución: Lognormal
Kolmogorov-Smirnov $d = .1153934$, $p = n.s.$
Chi-Square: 5.584162 , $df = 3$, $p = .1337137$

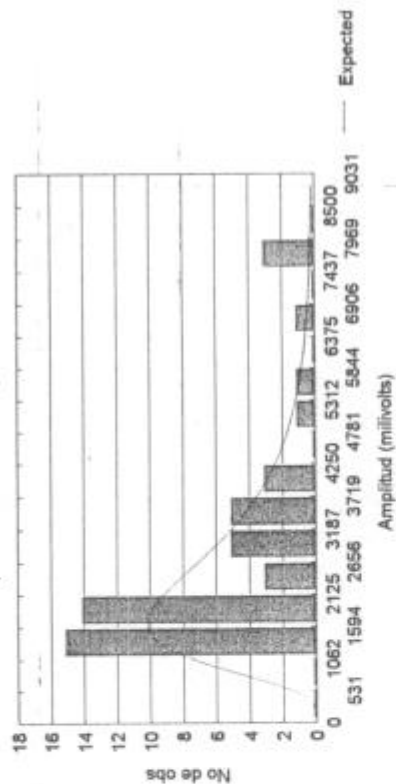


Fig. 3 Risetime ARI31 ; distribución: Exponencial
Kolmogorov-Smirnov $d = .0559055$, $p = n.s.$
Chi-Square: 1.723089 , $df = 4$, $p = .7865180$

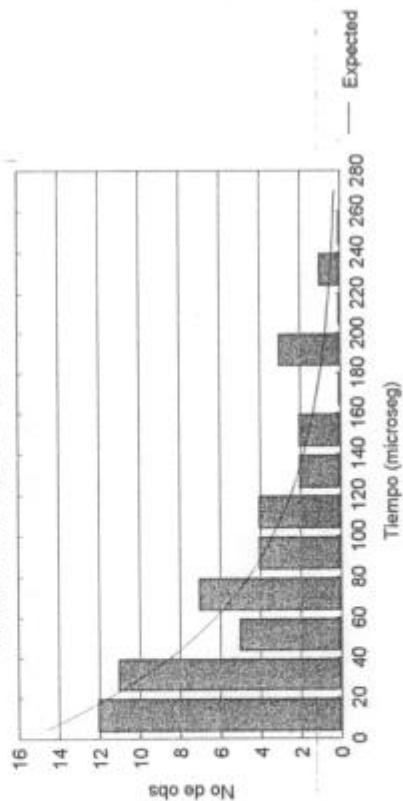
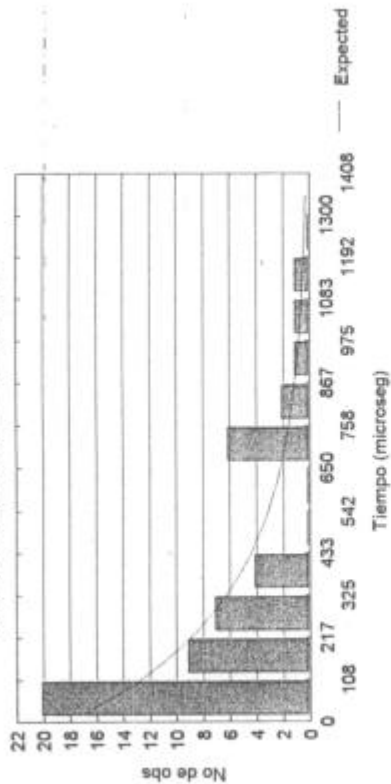


Fig. 2 Duracion ARI31 ; distribución: Exponencial
Kolmogorov-Smirnov $d = .0988565$, $p = n.s.$
Chi-Square: 12.51568 , $df = 4$, $p = .0139139$



ARI 31 EVENTOS VALIDOS

Fig. 66. Ajuste de distribuciones para A, D y RT. Ensayo 31

Fig. 1 Amplitud ARI33; distribución: Lognormal
Kolmogorov-Smirnov $d = .1233049$, $p = n.s.$
Chi-Square: 16.73417, $df = 4$, $p = .0021806$

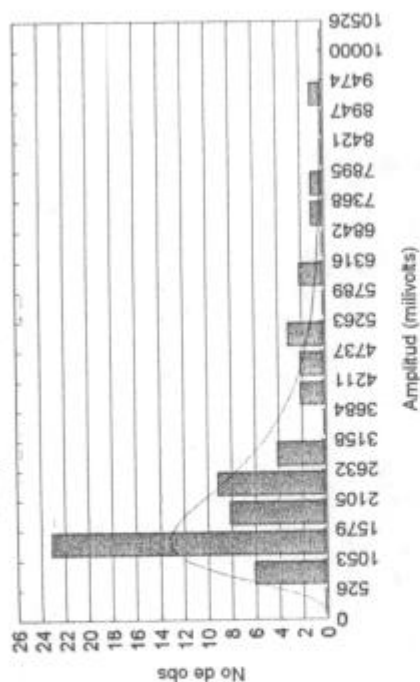


Fig. 3 Risetime ARI33; distribución: Exponential
Kolmogorov-Smirnov $d = .1064196$, $p = n.s.$
Chi-Square: 6.96211, $df = 4$, $p = .1361175$

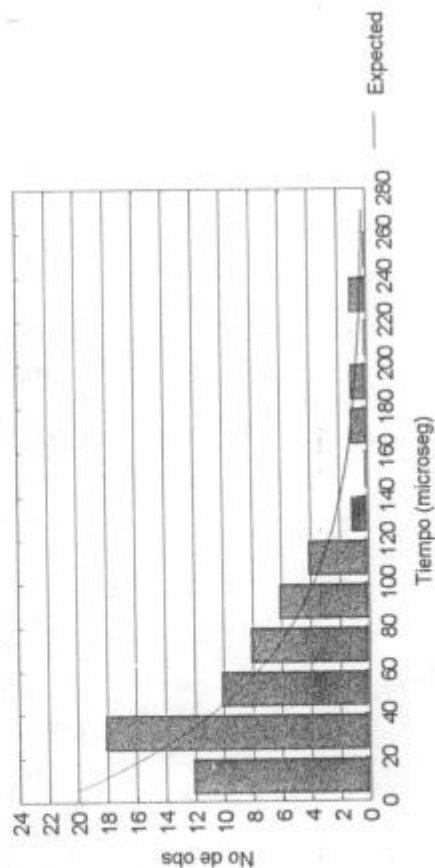
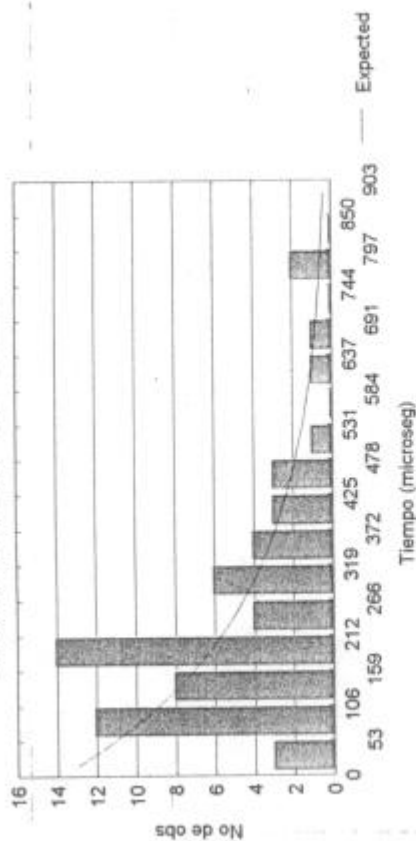


Fig. 2 Duracion ARI33; distribución: Exponencial
Kolmogorov-Smirnov $d = .1523445$, $p < .15$
Chi-Square: 19.11394, $df = 6$, $p = .0039828$



ARI 33 EVENTOS VALIDOS

Fig. 67. Ajuste de distribuciones para A, D y RT. Ensayo 33

Fig. 1 Amplitud ARI34 ; distribución: Lognormal
Kolmogorov-Smirnov $d = .1136322$, $p = n.s.$
Chi-Square: $df = 0$, $p = ---$

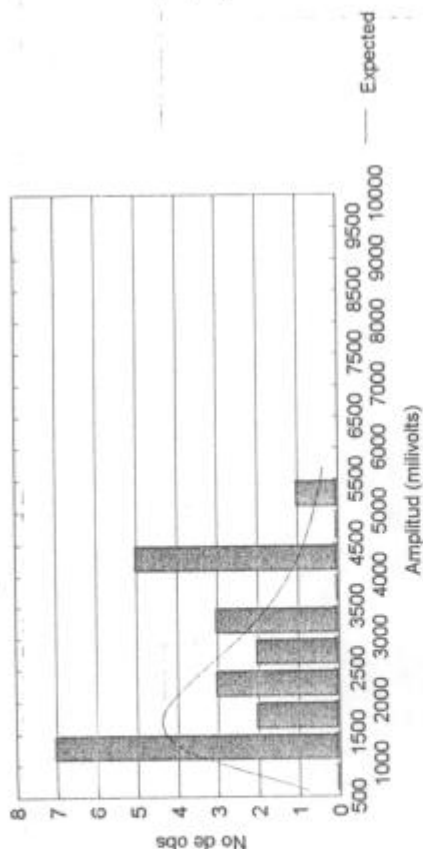


Fig. 3 Risetime ARI34; distribución: Exponencial
Kolmogorov-Smirnov $d = .0943668$, $p = n.s.$
Chi-Square: 1.223444 , $df = 1$, $p = .2686941$

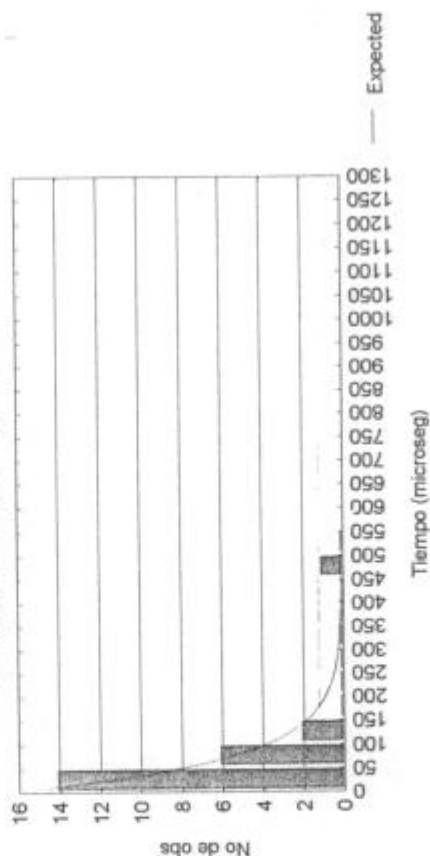
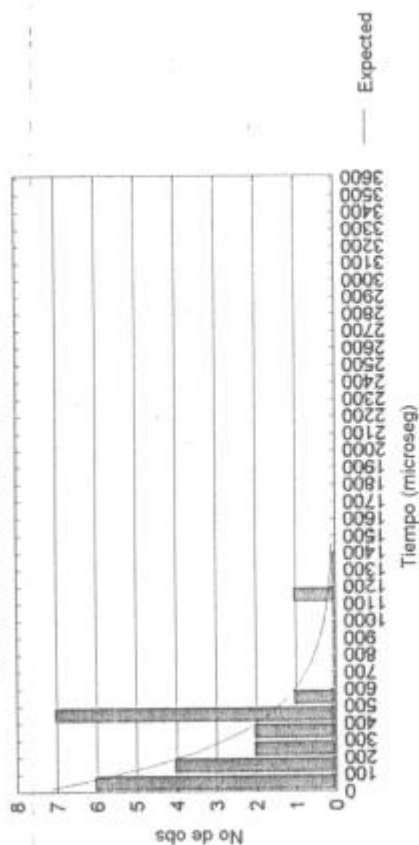


Fig. 2 Duracion ARI34; distribución: Exponencial
Kolmogorov-Smirnov $d = .1356097$, $p = n.s.$
Chi-Square: 1.501256 , $df = 1$, $p = .2204873$



ARI 34 EVENTOS VALIDOS

Fig. 1 Amplitud ARI35 ; distribución: Lognormal
Kolmogorov-Smirnov $d = .1143608$, $p = n.s.$
Chi-Square: 13.20243, $df = 4$, $p = .0103383$

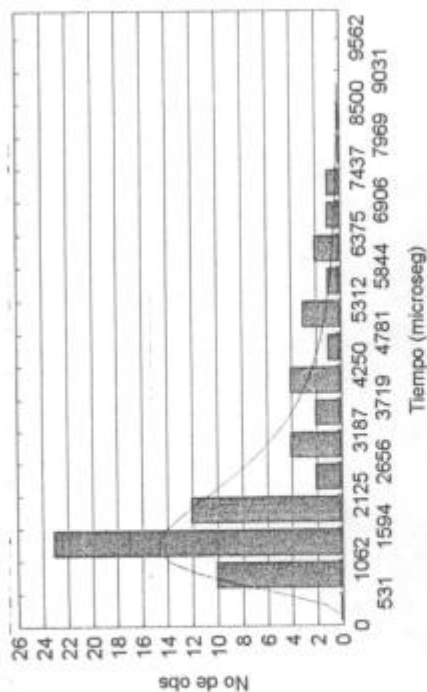


Fig. 3 Rise time ARI35; distribución: Exponencial
Kolmogorov-Smirnov $d = .0599656$, $p = n.s.$
Chi-Square: 1.075543, $df = 1$, $p = .2997047$

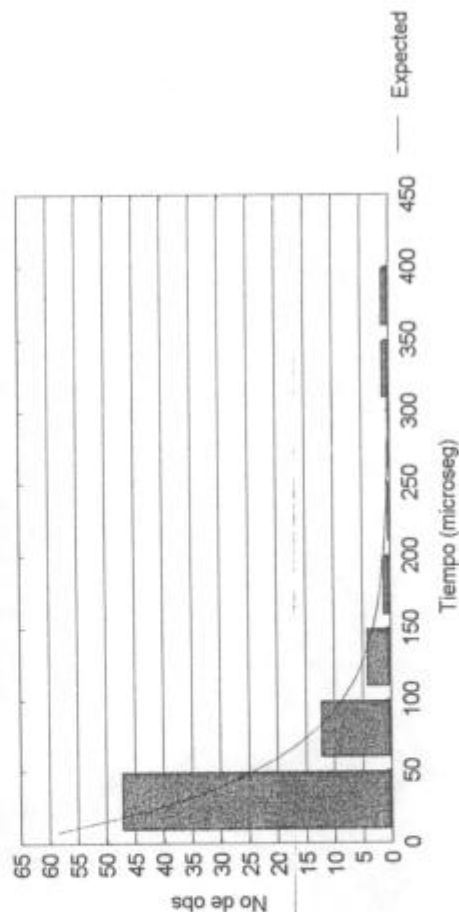
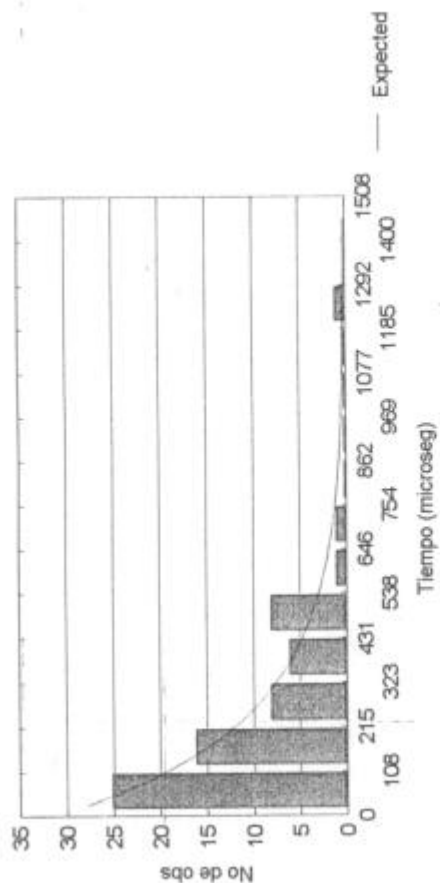


Fig. 2 Duracion ARI35 ; distribución: Exponencial
Kolmogorov-Smirnov $d = .0469736$, $p = n.s.$
Chi-Square: .4365607, $df = 3$, $p = .9325834$



ARI 35 EVENTOS VALIDOS

Fig. 69. Ajuste de distribuciones para A, D y RT. Ensayo 35

Fig. 1 Amplitud ARI36 ; distribution: Lognormal
Kolmogorov-Smirnov $d = .1487114$, $p = n.s.$
Chi-Square: —, $df = 0$, $p = —$

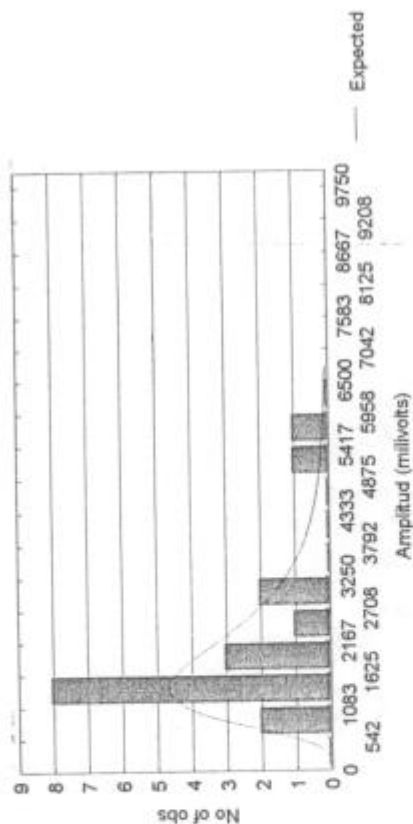


Fig. 2 Duracion ARI36 ; distribution: Exponencial
Kolmogorov-Smirnov $d = .2744861$, $p < .15$
Chi-Square: 9.830175, $df = 1$, $p = .0017183$

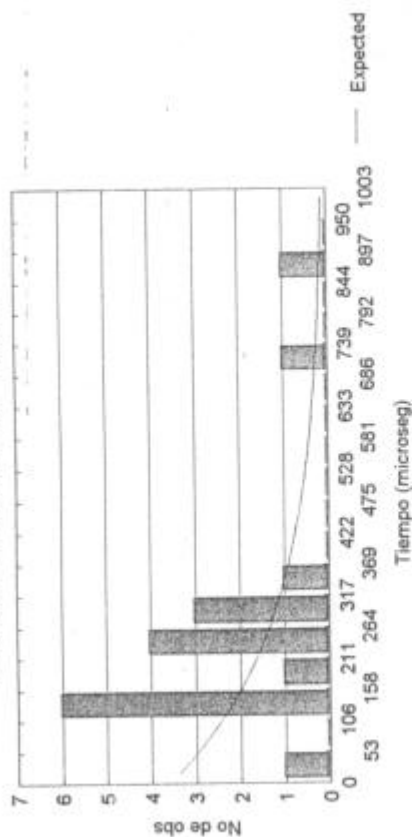
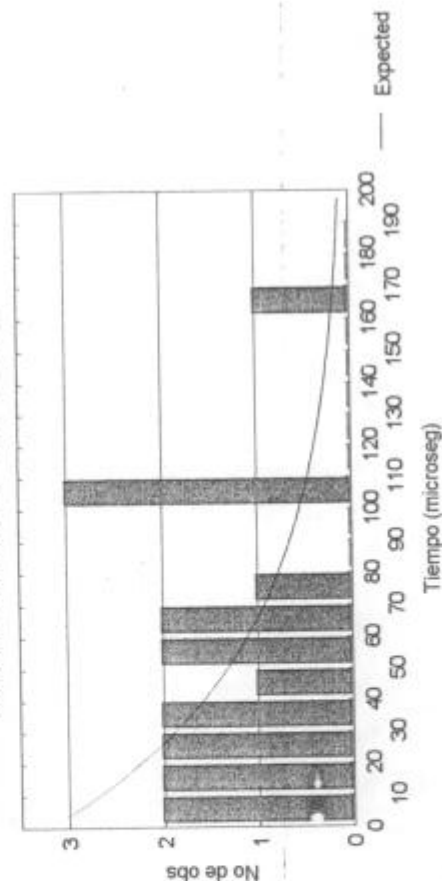


Fig. 3 Risetime ARI36 ; distribution: Exponencial
Kolmogorov-Smirnov $d = .0908789$, $p = n.s.$
Chi-Square: 7.407455, $df = 1$, $p = .3694286$



ARI 36 EVENTOS VALIDOS

Fig. 70. Ajuste de distribuciones para A, D y RT. Ensayo 36

5- CONCLUSIONES

El equipo de presurización construido, permite la realización de los ensayos de explosión de vainas, de manera satisfactoria. Así mismo, la técnica del ensayo y el instrumental utilizado han demostrado ser útiles para la medición de la EA producida.

En cuanto a las vainas, la dinámica que conduce a la rotura es siempre la misma: la vaina "se abanana" y rompe en la cara interna de la curva, con forma de "S" o "C", además la rotura siempre se produce en el tercio medio de la longitud de la vaina.

En ninguno de los ensayos efectuados en vainas con defectos, la probeta rompió en éstos, de la misma manera, en los 36 ensayos efectuados, la rotura se produjo por una fractura dúctil.

En cuanto a la EA, en todos los ensayos la mayoría de los eventos de EA se producen entre el 90% y el 100% de la presión de rotura.

Al hacer el estudio de la distribución de las amplitudes de los eventos, se encontró que se logra un buen ajuste con una distribución lognormal.

En base a las características de los eventos registrados, no fue posible distinguir las distintas etapas de la fractura de las vainas.

Se observó que en las vainas defectuosas comienzan a producirse eventos de EA a presiones inferiores a las de inicio de la emisión para las vainas sin defectos.

Del análisis realizado en la EA producida en las vainas durante los ensayos efectuados, se encontró que la duración de los eventos permitiría distinguir las vainas con defectos de las que no lo tienen.

Puede concluirse que sería necesario ampliar el número de ensayos para que las conclusiones tuvieran una mayor solidez estadística, además sería conveniente realizar ensayos con vainas que presenten defectos internos (en este trabajo sólo se estudiaron defectos externos).

Para identificar mejor los mecanismos de producción de EA se podría interrumpir los ensayos en distintas etapas, preparar las correspondientes probetas e investigar la microestructura de la zona deformada o de fractura en cada caso.

El futuro análisis en frecuencia de las señales ya digitalizadas, permitirá la caracterización espectral de los eventos de EA y probablemente arrojará datos muy útiles que posibiliten identificar distintas fuentes de EA.

6- REFERENCIAS

1. C.B. Scruby, An Introduction to Acoustic Emission, J.Phys.E. Instrum., volume 20, pp. 946-953, 1987.
2. C.R. Heiple and S.H. Carpenter, Acoustic Emission produced by deformation of metals and alloys - A review: part I, Journal of Acoustic Emission, Volume 6, number 3.
3. C.R. Heiple and S.H. Carpenter, Acoustic Emission produced by deformation of metals and alloys - A review: part II, Journal of Acoustic Emission Volume 6, number 4.
4. H.N.G. Wadley, C.B. Scruby and J.H. Speake, Acoustic Emission for physical examination of metals, International Metals Reviews, 1980 N° 2.
5. Adrian A. Pollock, Acoustic Emission inspection, Methods of Nondestructive Evaluation, pp 278-294. 1989.
6. A.G. Beattie, Acoustic Emission, Principles and Instrumentation, Journal of Acoustic Emission.
7. AEDOS. Sistema multicanale di acquisizione ed elaborazione dati di emissione acustica, Manuale d'istruzione. CISE spa.
8. M.S. Granovsky, Fases Precipitadas en Zircaloy-4. Fases de Laves, Tesis de Doctorado en Ciencias Físicas. 1997.
9. C.R.J. Castro, Estudio de la deformación Plástica Biaxial de Vainas de Zrly-4, Informe Final de la Asignatura de Seminario de Física. 1997.
10. B. Larsson, The manufacture of Zircaloy and Stainless Steel Canning Tubes, Sandviken, Sweden.
11. B.A. Cheadle, Introduction to the Physical Metallurgy of Zirconium Alloys, The Physical Metallurgy of Zirconium Alloys. 1974.
12. S. Erlenkamper, Time and Amplitude Statistics of Acoustic Emission Signals in Fracture Mechanic Experiments, Acoustic Emission, Deutsche Gesellschaft fur Metallkunde E.V. 1979.
13. J.E. Ruzzante, Emisión Acústica (parte 1), CNEA-NT 9/91.
14. C.M. Chen, Acoustic Emission from Deformation of Zinc", tesis doctoral, University of Denver, Denver, CO 1982.
15. V.S. Boiko, L.G. Ivanchenko, and L.F. Krivenko, Sov. Phys. Solid State, 26, 1340-1341. 1984.

16. K. Takashima, Y. Higo, and S. Nunomura, Proceedings of the Fifth International Acoustic Emission Symposium, Japanese Society for Nondestructive inspection, Tokio, Japan, pp. 261-269. 1980.
17. D. Jaffrey, Proceedings of the Ninth World Conference on Nondestructive Testing, Australian Institute of metals, Parkville, Victoria, Australia, Paper 4J-1. 1979.
18. K. Ono, Acoustic Emission and Microscopic Deformation and Fracture Processes, Proceedings of the Second Acoustic Emission Symposium, Tokio, Japan, Jpn Ind. Planning Assoc., Tokio, Secc. 4, pp. 1-63. 1974.
19. S.McK. Cousland and C.M. Scala, Met. Sci. Eng., 15, 609-614. 1981.
20. S.McK. Cousland and C.M. Scala, Mater. Sci. Eng., 57, 23-29. 1983.
21. M.A. Hamstad, E.M. Leon, and A.K. Mukherjee, Met. Sci., 541-548. 1981.
22. K. Ono, R. Landy and C. Ouchi, Proceedings of the Fourth AE Symposium, International Technical Exchange Center, Tokyo, Japan: 4-33 - 4-45. 1978.
23. T. Ingham, A.L. Stott, and A. Cowan: Inst. J. Pressure Vessels Piping, 1974, 2,31.
24. C.B. Scruby, Research Techniques in Nondestructive Testing vol. 8, ed. R S Sharp (London: Academic) p 141. 1985.
25. M. Arrington, Acoustic Emission, Non -destructive Testing of Fibre-Reinforce Plastics Composites, Chapter II (1987) p 36.
26. Comunicación personal con el Ing. Antonio Iorio.
27. Comunicación personal con el Dr. Abraham David Banchik.

7- AGRADECIMIENTOS

Dejo expresado mi agradecimiento:

Al Doctor José Ruzzante y a la Licenciada Isabel López Pumarega, por la dirección de este trabajo.

A CONUAR S.A. por el generoso aporte de vainas combustibles.

Al Ing. Carlos Zunino, Daniel Arias, el Ing. Roberto Ributtini y Gustavo Maumus de CONUAR S.A. por responder generosamente todas mis consultas.

A José Falcone por su gran ayuda, tanto en el armado del equipo de presurización como en la repuestas a todas mis dudas con respecto a la técnica del ensayo.

A Oscar Carpineta por su gran ayuda en el armado del equipo de presurización y en el préstamo de herramientas.

Al Ing. Carlos Muñoz por su ayuda en la construcción de lacaja de protección.

A la Lic. Silvia Balart por su gran ayuda en la caracterización metalográfica de los defectos superficiales de las vainas.

Al Ing. Antonio Iorio, la Dra. Delia Arias, la Dra. Marta Granovsky y el Dr. Abraham Banchik por la amabilidad con que atendieron mis consultas.

Al Ing. Horacio Regalini de Hidraulica S.A. por su asesoramiento en el armado del equipo de presurización.

A Andrés Acosta y José Caggiano por el mecanizado de las distintas piezas.

A Adriana Dominguez y Sara Novas por la operación del MEB.

A la Dra. Rosa Piotrkowski, a la Lic. Maria Elisa Oliveto, a María Armeite y a Martín Gomez por su gran ayuda y apoyo.

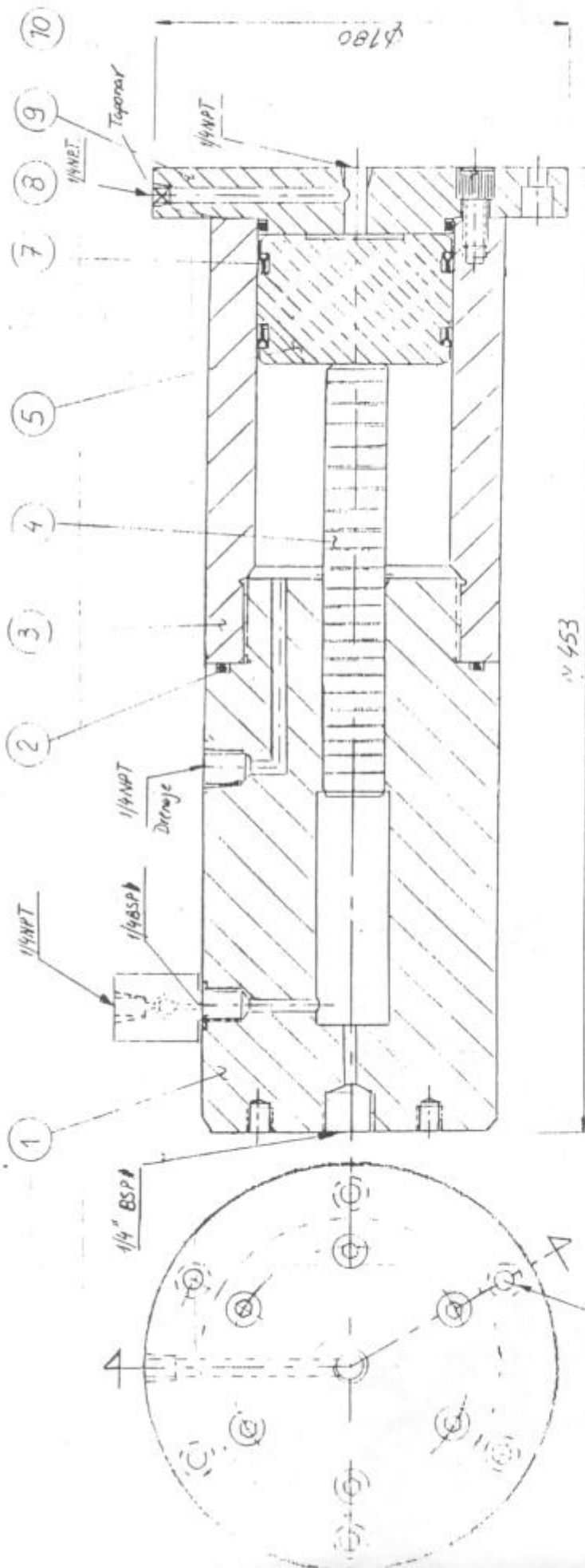
A la U.A. ENDE y a la U.A. Materiales por haber puesto a mi disposición los recursos humanos, instalaciones, equipos y materiales necesarios para realizar los ensayos y estudios pertinentes.

A Inés y a Manuel por su amistad.

ING. JOSE ARIEL REGUEIRO

APENDICE

Cilindro multiplicador de presión



N 453

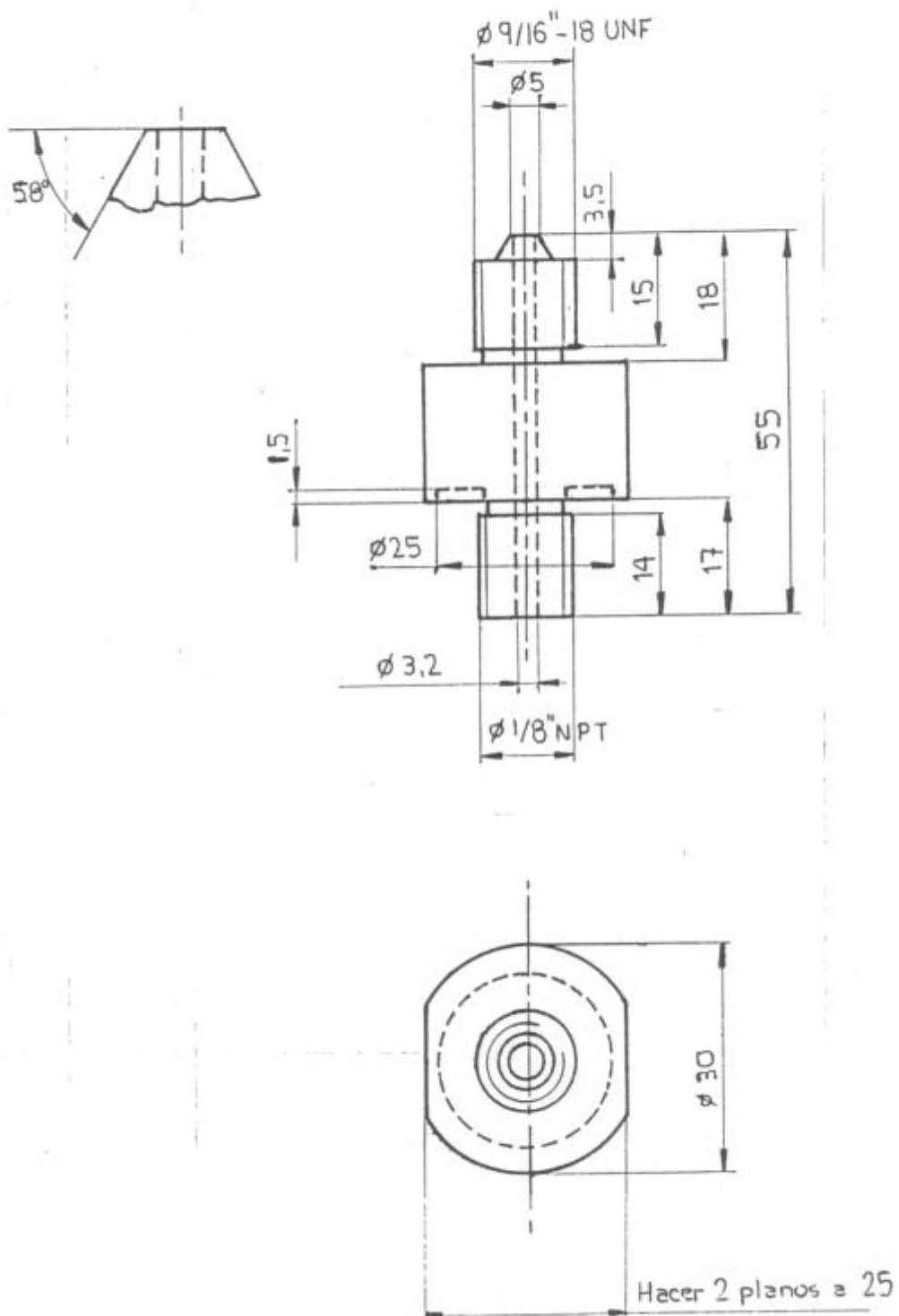
- 5 Pistón de baja 1 Fundición Gris
- 4 Pistón de alta 1 S.A.E 8620
- 3 Cabezal baja presión 1 S.A.E 4140
- 2 O Ring 1 Parker N° 2-245 Buna N

POS.	DENOMINACION	CANT.	MODELO
1	Cabezal alta presión	1	S.A.E 4140
PROYECTO	H.E.F.		
DIBUJO	CAH		
REVISO			
APROBO			
ESCALA: CILINDRO INTENSIFICADOR ϕ Pistón alta = 30mm ϕ Pistón baja = 88.9mm Penetrada = 120 Kg/cm² ϕ salida = 7080 Kg/cm² Carretera = 100mm			
REVISION JOA N° VA N° PLANO N°			

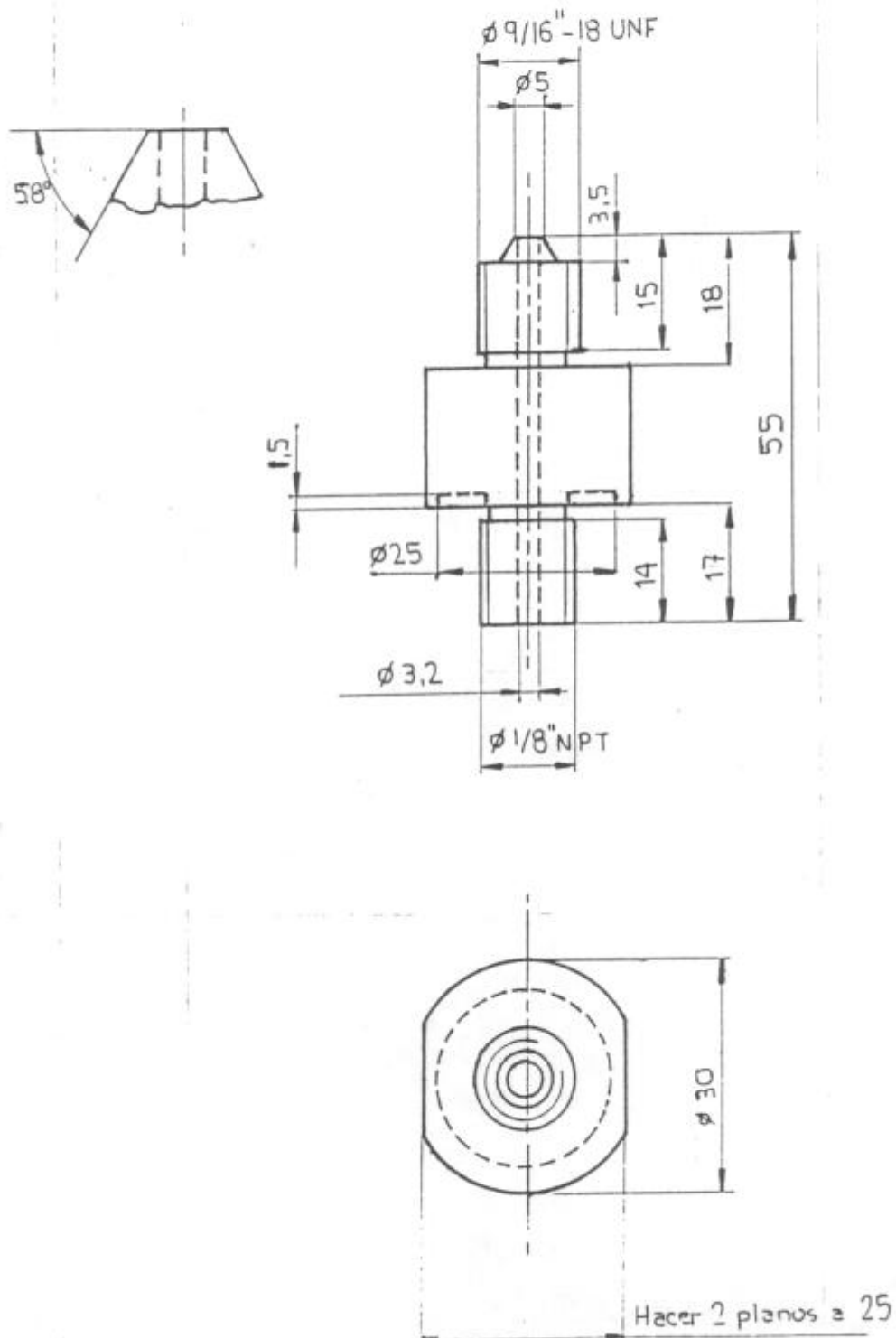
ISN
HIDRAULICA S.V.
SOCIEDAD ANONIMA

SISTEMAS OLEOHIDRAULICOS

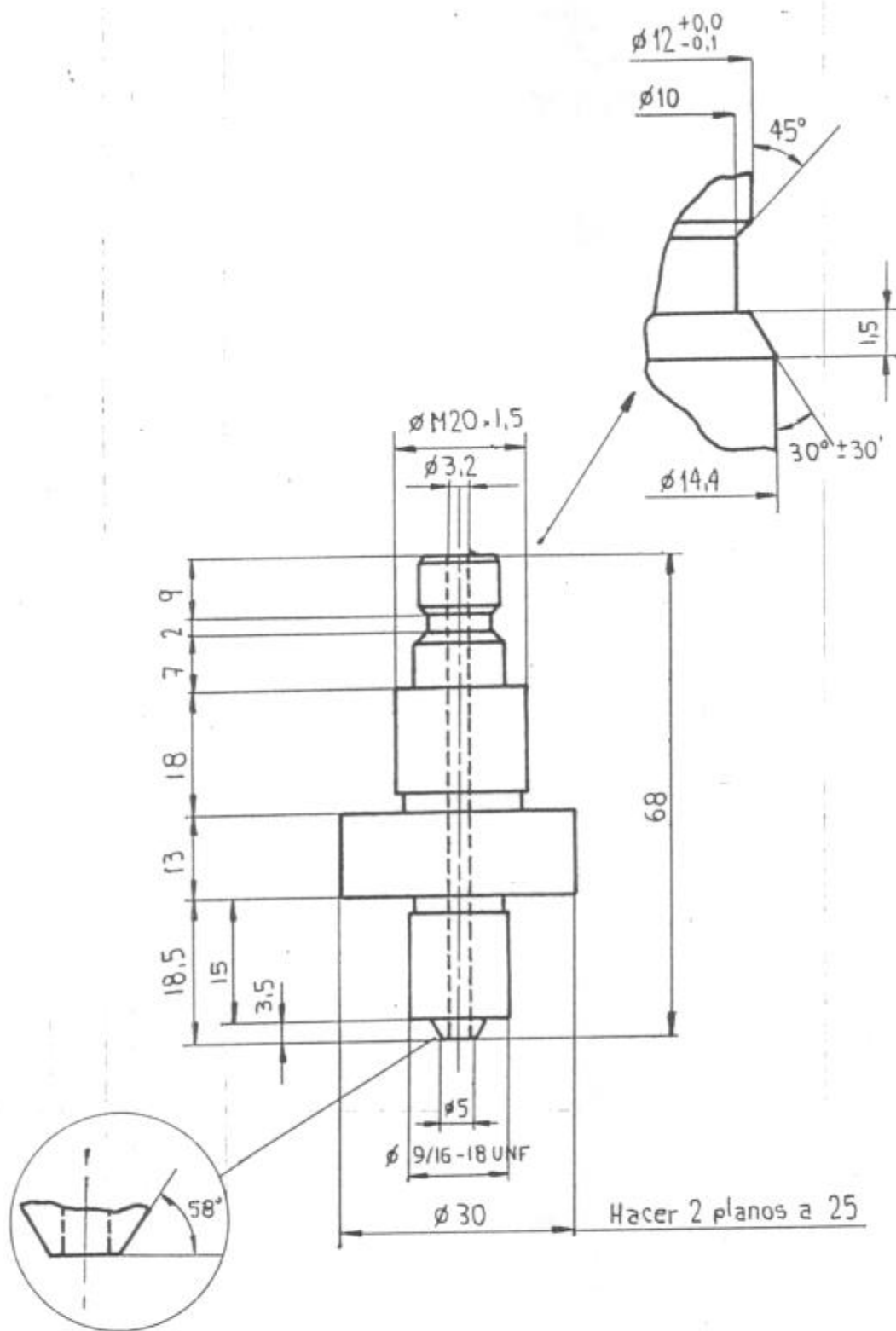
POS.	DENOMINACION	CANT.	MODELO
10	Tornillos allen	6	3/8-16 NC-2"
9	Tapa	1	S.A.E 1020
8	O Ring	1	Parker N° 2-235 Buna N
7	Polypak	2	Parker N° 18703125-375 B



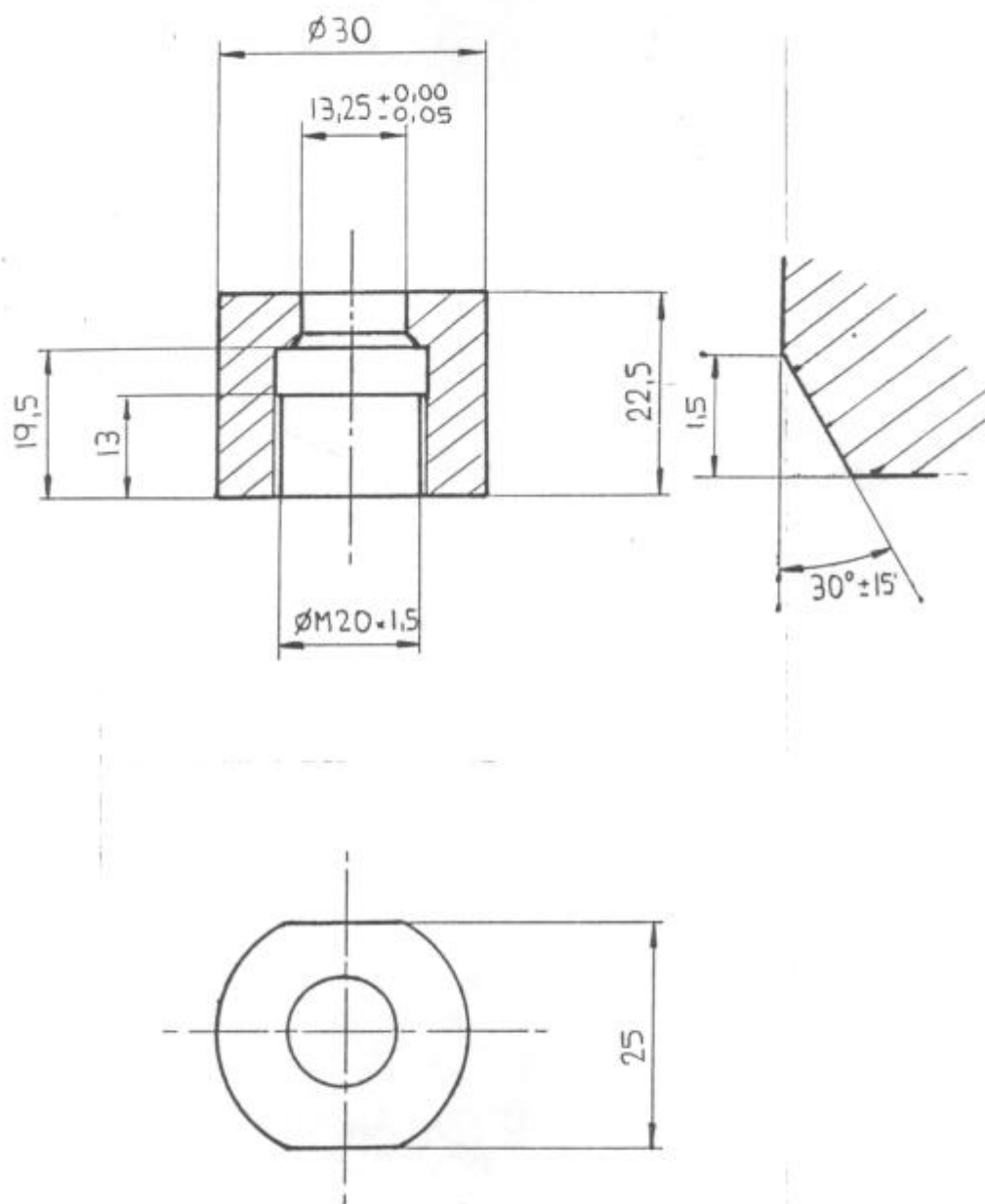
Acople Vaina Cilindro. Pieza 1



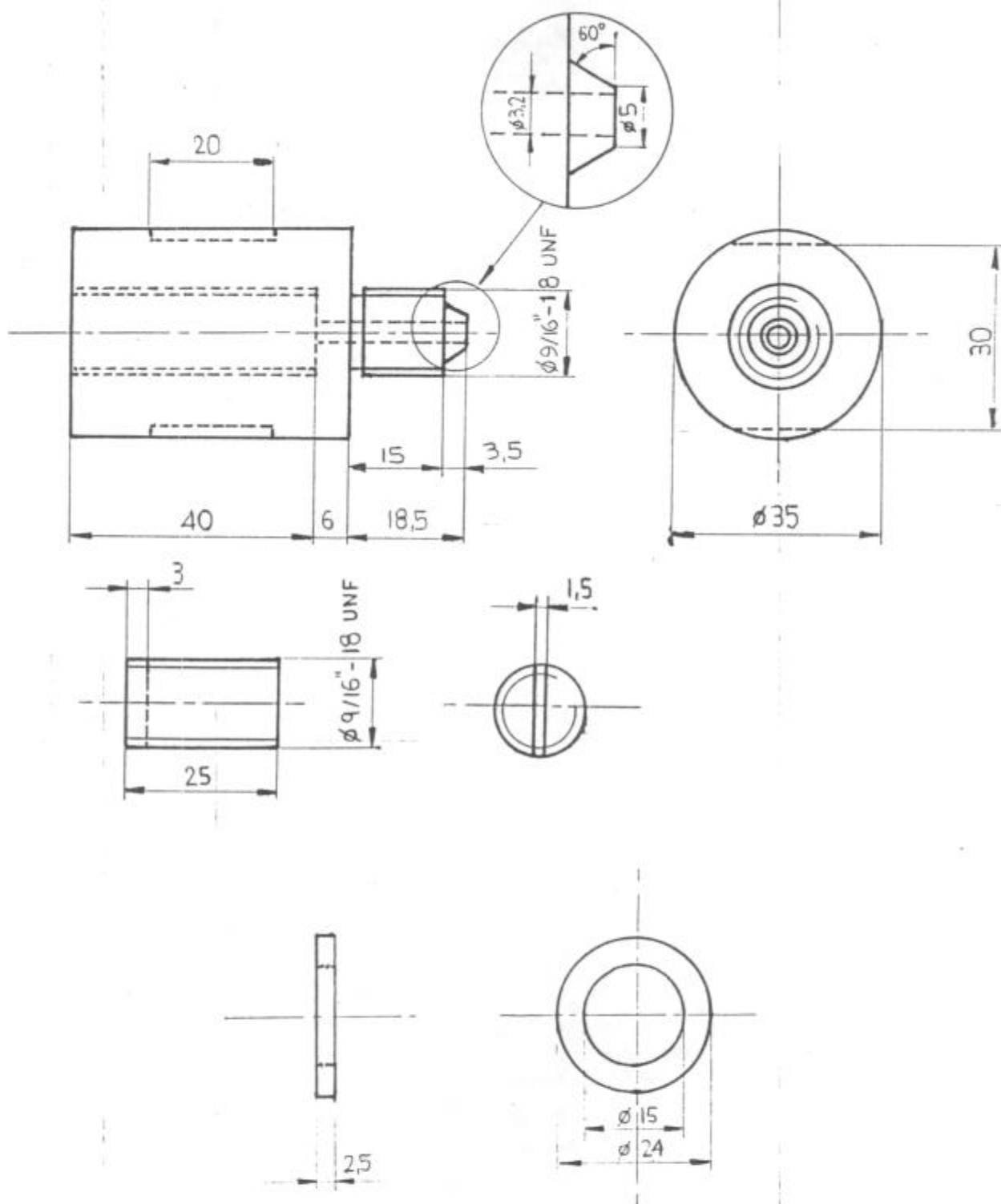
Acople Vaina Cilindro. Pieza 3



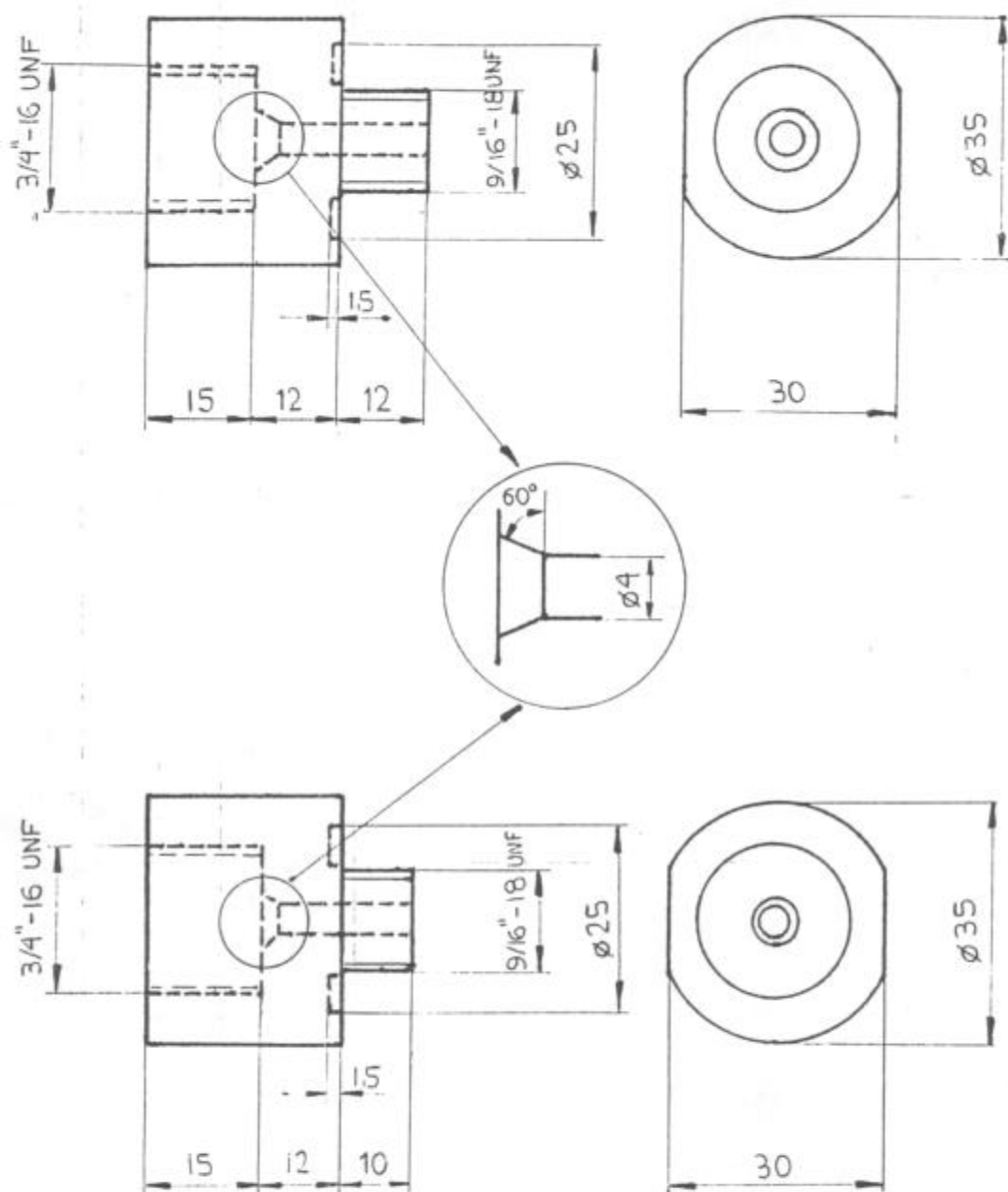
Acople Vaina Cilindro. Pieza 4



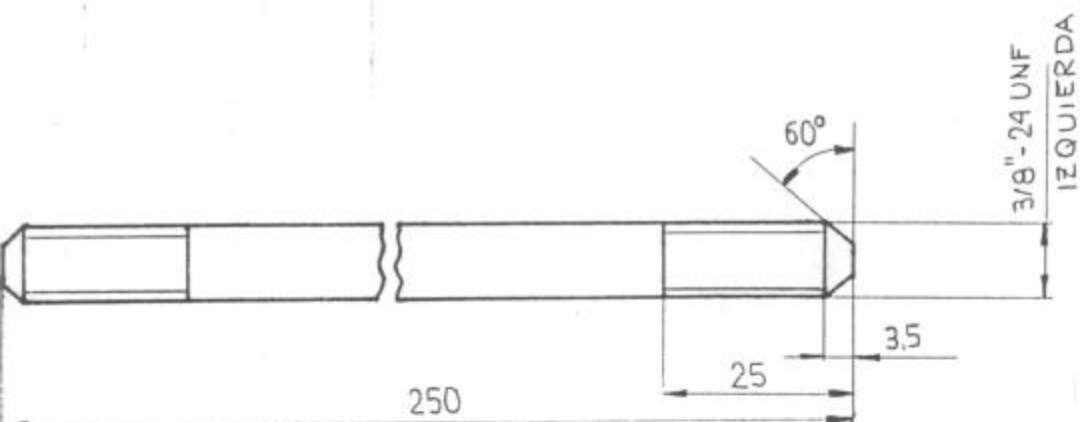
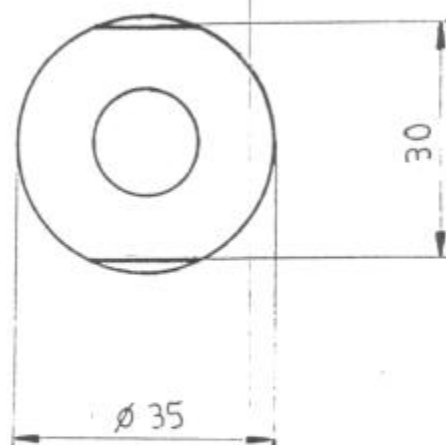
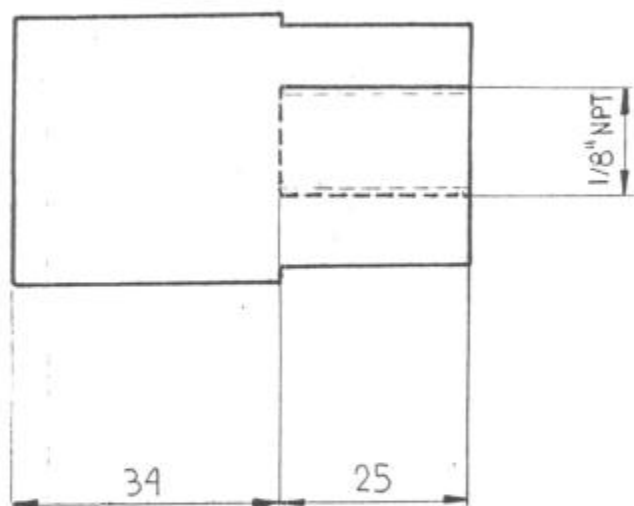
Acople Vaina Cilindro. Pieza 5



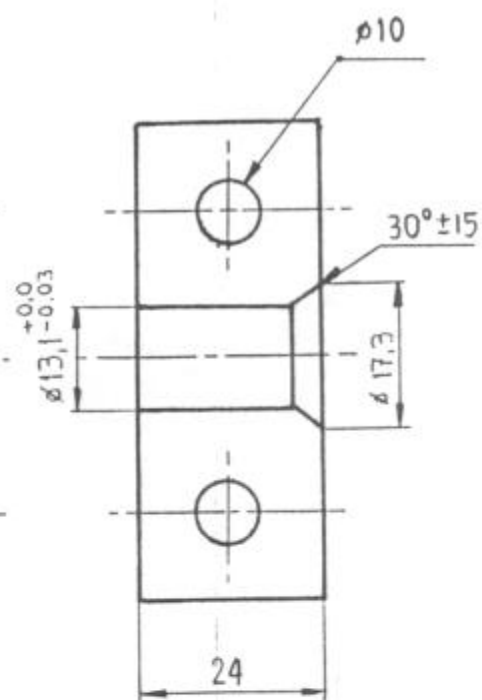
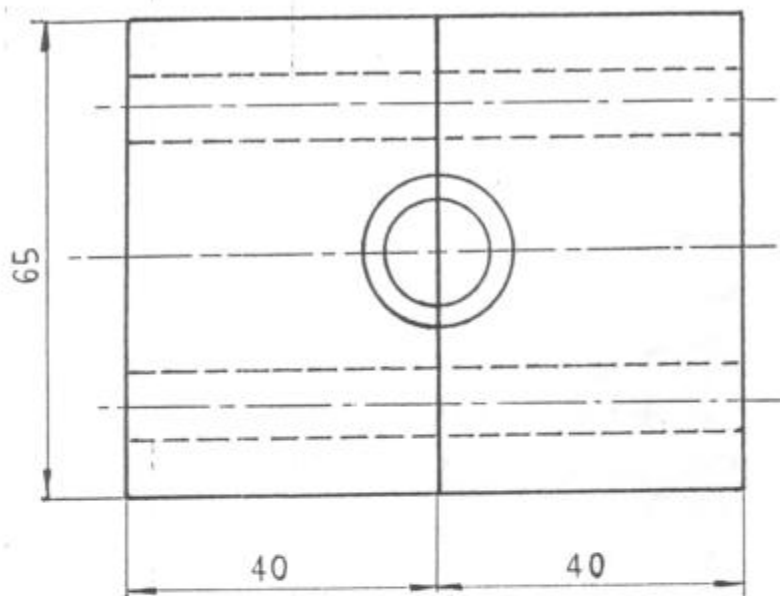
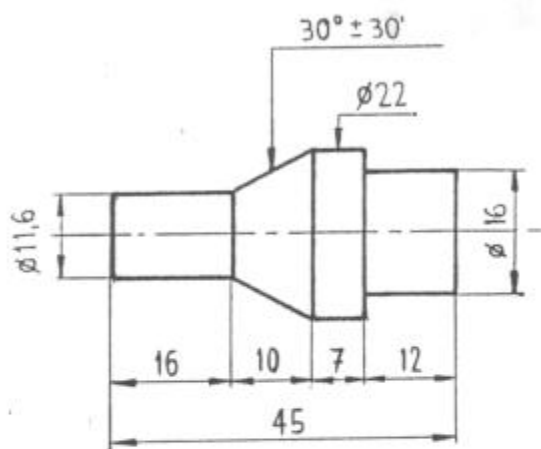
Acople Vaina Cilindro. Pieza 8 y arandela



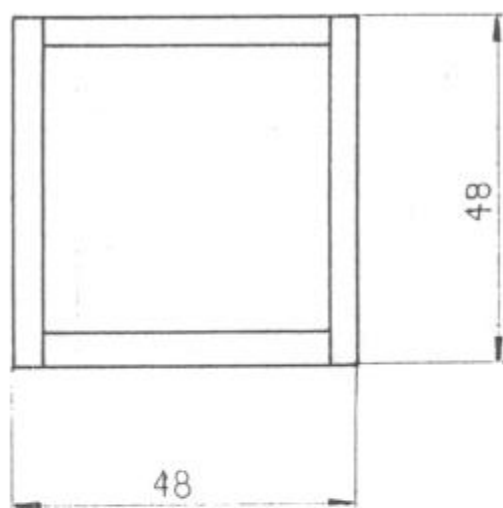
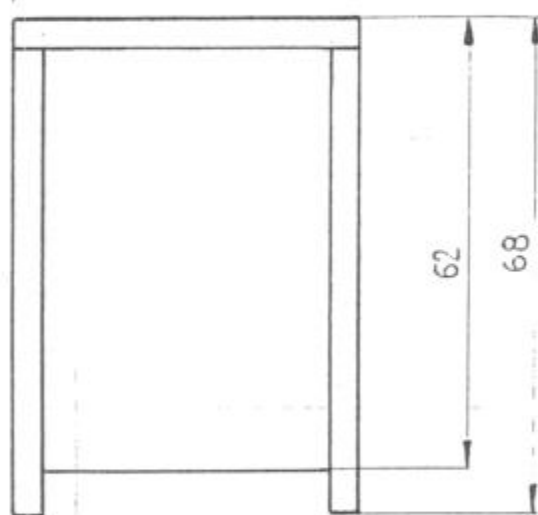
Acople Vaina Cilindro. Piezas 9 y 11



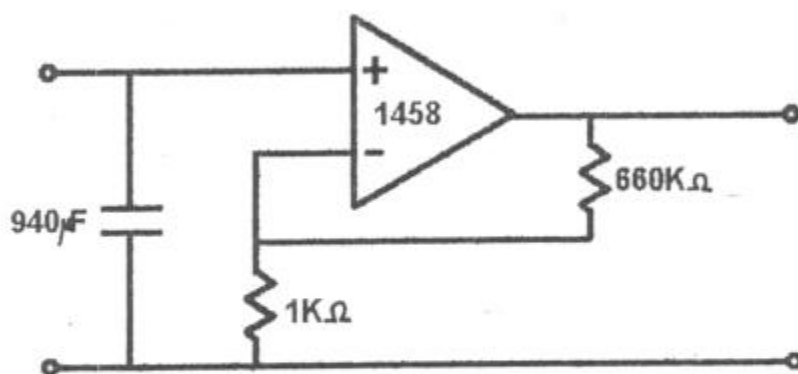
Acople Vaina Cilindro. Piezas 10 y 12



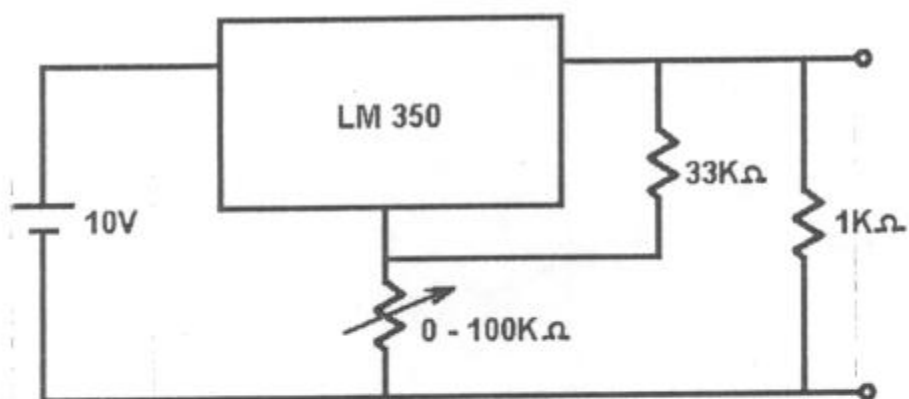
Acople Vaina Cilindro. Pieza abocardadora



Caja de protección



Amplificador de tensión para el sensor de presión



Fuente de tensión variable para el control de la válvula proporcional

Especificaciones técnicas

- 1- Tensión de alimentación ... 24VCA +/- 10%.
- 2- Consumo 30 VA Máx.
- 3- Corriente de salida 800mA Máx.
- 4- Resistencia de carga 30 OHM Min.
- 5- Frecuencia de dither 200 Hz.
- 6- Fusible de protección 1.5A/20mm.

Calibración

La tarjeta 310-591 dispone de cinco presets de calibración. La magnitud a controlar se encuentra indicada sobre cada uno de ellos facilitando su identificación.

1- DITHER: ajusta la corriente de dither aplicada a la válvula, esta calibración se realiza durante la fabricación de la tarjeta, **NO DEBE SER MODIFICADA.**

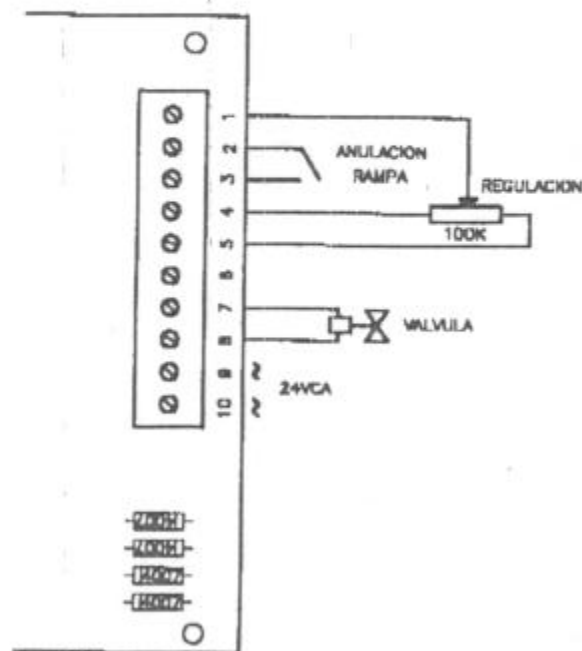
2- MAX: corriente máxima aplicada al solenoide, su rango de variación va desde 0 a 800mA. Debe ser calibrada con el potenciómetro en la posición de máxima presión. La tarjeta sale calibrada de fábrica en 700mA.

3 MIN: corriente de reposo del solenoide, el ajuste debe hacerse con el potenciómetro en la posición de mínima presión. el ajuste de fábrica es de 200mA.

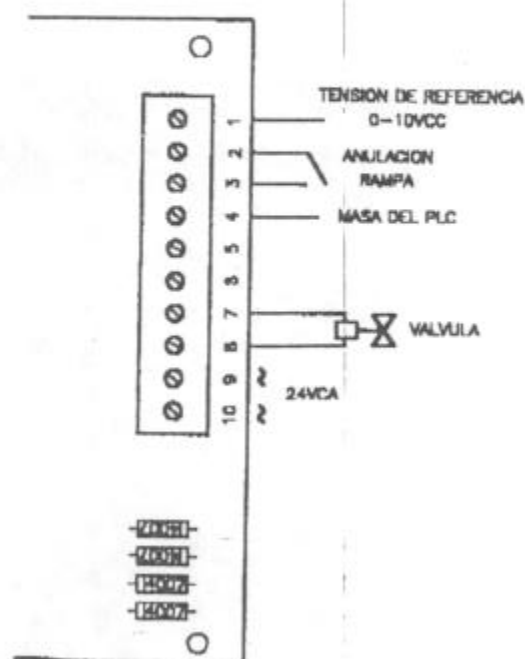
4- ASC: rampa de ascenso desde MIN a MAX, su rango de variación va desde 0 a 5 seg.

5- DES: rampa de descenso desde MAX a MIN, su rango de variación va desde 0 a 5 seg.

Diagramas de conexión



CONEXIÓN CON POTENCIOMETRO



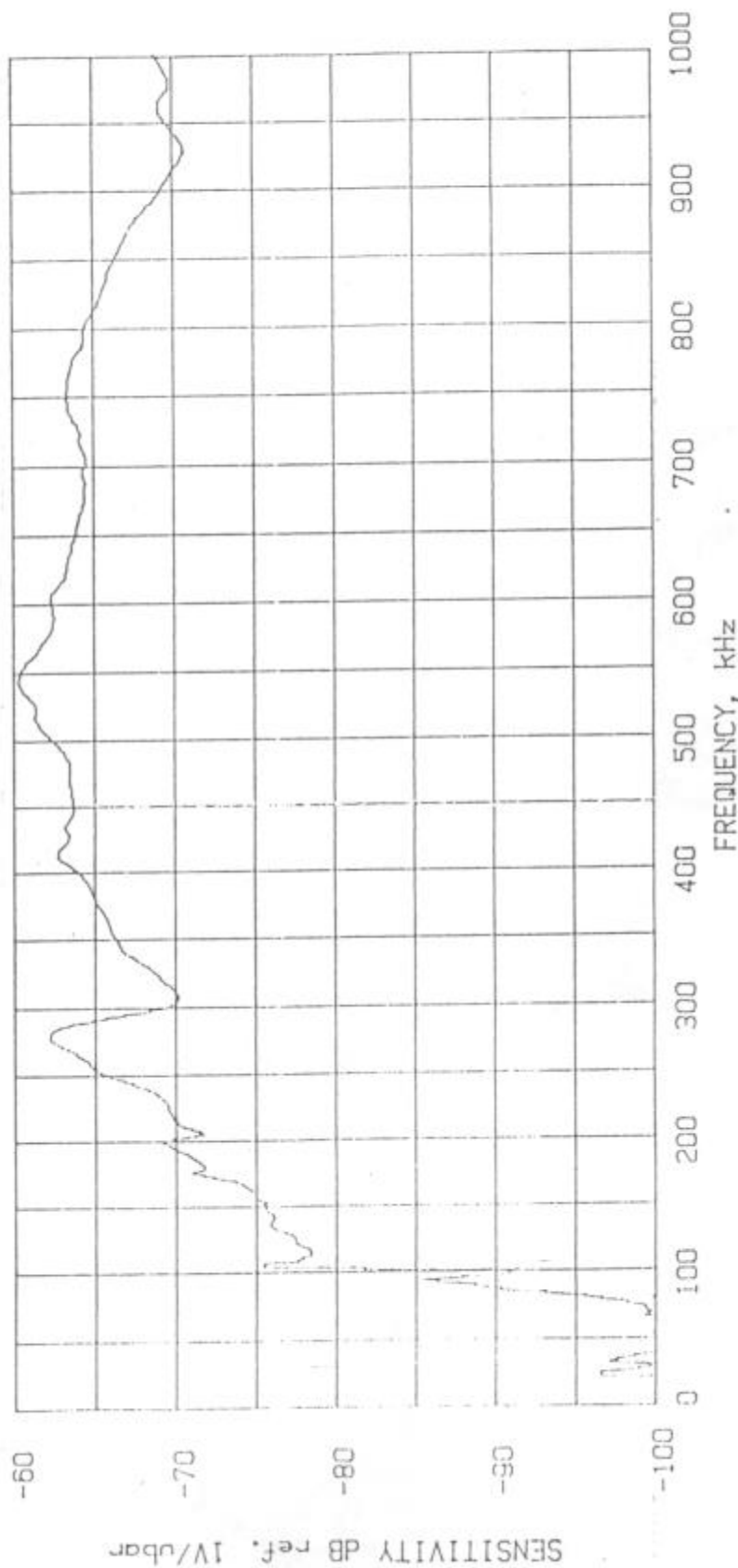
CONEXIÓN CON PLC

"Sound Technology for Productivity and Safety"

MODEL NUMBER: WD DATE: 03/22/91

SERIAL NUMBER: 943 TESTED BY: C.E.

Curva de calibración del sensor



PAC certifies that this sensor meets all performance, environmental, and physical standards established in applicable PAC specifications. Calibration methodology based on ASTM standard E976- "Standard Guide for Determining the Reproducibility of Acoustic Emission Sensor Response".